

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia de Energia

Projeto e Construção de um Sistema de Aquisição e Condicionamento de Sinais Para Monitoramento da Qualidade de Energia

Autor: Paulo Henrique Alves dos Reis

Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

Brasília, DF

2018



Paulo Henrique Alves dos Reis

Projeto e Construção de um Sistema de Aquisição e Condicionamento de Sinais Para Monitoramento da Qualidade de Energia

Monografia submetida ao curso de graduação
em Engenharia de Energia da Universidade
de Brasília, como requisito parcial para ob-
tenção do Título de Bacharel em Engenharia
de Energia.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

Brasília, DF

2018

Paulo Henrique Alves dos Reis

Projeto e Construção de um Sistema de Aquisição e Condicionamento de Sinais Para Monitoramento da Qualidade de Energia/ Paulo Henrique Alves dos Reis. – Brasília, DF, 2018-

74 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA , 2018.

1. Monitoramento. 2. Qualidade de Energia Elétrica. I. Prof. Dr. Alex Reis.
II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Projeto e Construção de um Sistema de Aquisição e Condicionamento de Sinais Para Monitoramento da Qualidade de Energia

CDU 621.3.02

Paulo Henrique Alves dos Reis

Projeto e Construção de um Sistema de Aquisição e Condicionamento de Sinais Para Monitoramento da Qualidade de Energia

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 21 de Março de 2018:

Prof. Dr. Alex Reis
Orientador

Prof. Dr. Jorge Andrés Cormane
Angarita
Convidado 1

Profa. Dra. Loana Nunes Velasco
Convidado 2

Brasília, DF
2018

Este trabalho é dedicado a todos que me ajudaram a chegar aqui, principalmente minha família que muito me apoiou e deu suporte diante as dificuldades.

Agradecimentos

Em primeiro lugar à Universidade de Brasília pela oportunidade do ensino superior de excelência e por contribuir de muitas formas para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

Ao meu orientador, Alex Reis pelo suporte, motivação, amizade e pela oportunidade de trabalhar em um tema que eu mesmo não escolheria melhor.

A toda minha família, em especial à minha mãe que me ensinou a prioridade dos estudos e por isso me inspira até hoje a continuar buscando. Ao meu pai e meu irmão por estarem sempre ao meu lado me apoiando de todas as formas.

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou
sobre aquilo que todo mundo vê.”
(Arthur Schopenhauer).*

Resumo

Pesquisas na área de Qualidade da Energia Elétrica têm conquistado crescente importância no cenário energético brasileiro e internacional. De fato, distintos fenômenos relacionados à área, normalmente atrelados com desvios ou perda de qualidade da energia elétrica, podem acarretar grandes transtornos para as redes elétricas de transmissão e distribuição, assim como também para diversos grupos de consumidores conectados à rede, sejam eles industriais, comerciais ou residenciais. Tendo em vista tais aspectos, este trabalho tem por objetivo o projeto, construção e testes de desempenho de um sistema destinado à aquisição e condicionamento de sinais de tensão e corrente, o qual pode ser aplicado, por exemplo, em dispositivos de medição em baixa tensão. As etapas de desenvolvimento deste trabalho envolvem uma análise teórica dos circuitos que compõe o sistema (sensores, filtros, etc.) e respectiva caracterização matemática, simulações computacionais para a especificação de componentes eletrônicos, construção de protótipo e ensaios laboratoriais para validação de desempenho. Os resultados mostram a aderência do sistema de aquisição e condicionamento de sinais ao comportamento físico esperado.

Palavras-chave: Monitoramento. Indicadores. Qualidade de Energia. Filtros. *Aliasing*.

Abstract

Research on the field of Electrical Power Quality has gained increasing importance in Brazilian and international energy sector. In fact, distinct phenomena, which is usually called as deviations or loss of Quality, can cause great inconvenience to the transmission and distribution electric networks, as well as to several groups of industrial, commercial or residential consumers. In view of these aspects, this work aims at the design, construction and performance tests of a voltage and current acquisition system, which can be applied, for example, to low voltage measuring devices. The development of this work involve a theoretical analysis of the circuits that compose the system (sensors, filters, etc.) and their mathematical characterization, computational simulations for the specification of electronic components, prototype construction and laboratory tests for performance validation. The results show the acquisition and conditioning system behaves as expected on the Project.

Key-words: Monitoring. Indicators. Power Quality. Filters. Aliasing.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplos de transitórios. Fonte: Adaptado de Dugan et al. (1995).	20
Figura 2 – Componentes harmônicos de terceira, quinta e sétima ordens. Fonte: Própria.	21
Figura 3 – Efeitos de offset e notching.	21
Figura 4 – Presença de ruídos em um sinal alternado senoidal. Fonte: Própria.	22
Figura 5 – Variação da tensão ocasionada pela operação de um forno a arco. Fonte:(MEHL, 2012).	24
Figura 6 – Exemplo da variação de frequência ao longo do tempo. Fonte: Própria.	24
Figura 7 – Sinais originais e reconstruídos para diferentes taxas de amostragens. Fonte:(OPPENHEIM; WILLSKY; NAWAB, 2010).	26
Figura 8 – Diagrama de <i>Bode</i> de um filtro passa baixas real mostrando suas regiões de análise. Fonte: Adaptado de Boylestad (2004).	27
Figura 9 – Diagrama de <i>Bode</i> de um filtro passa baixa real. Fonte: Adaptado de Boylestad (2004).	28
Figura 10 – Diagrama de <i>Bode</i> de uma filtro passa alta real. Fonte: Adaptado de Boylestad (2004).	28
Figura 11 – Diagrama de <i>Bode</i> de um filtro passa faixa real. Fonte: Adaptado de Boylestad (2004).	29
Figura 12 – Diagrama de <i>Bode</i> de uma filtro rejeita faixa real. Fonte: Adaptado de Boylestad (2004).	29
Figura 13 – Respostas em frequência do filtro <i>Butterworth</i> para $f_c = 5\text{ kHz}$ segunda ordem. Fonte: Própria.	30
Figura 14 – Respostas em frequência do filtro <i>Chebyshev</i> para $f_c = 5\text{ kHz}$ segunda ordem. Fonte: Própria.	30
Figura 15 – Respostas em frequência do filtro <i>Chebyshev</i> para $f_c = 5\text{ kHz}$ segunda ordem. Fonte: Própria.	31
Figura 16 – Diagrama de conexões do LV 25-P. Fonte: Adaptado de LEM (2014).	32
Figura 17 – Diagrama de conexões do LA 55-P. Fonte:(LEM, 2015).	33
Figura 18 – Processo do sistema de monitoramento de qualidade de energia. Fonte: Própria.	34
Figura 19 – Processo de aquisição e condicionamento de sinais. Fonte: Própria.	35
Figura 20 – Circuito do filtro Anti-aliasing com topologia <i>Sallen Key</i> . Fonte: Própria.	35
Figura 21 – Circuito atenuador de tensão. Fonte: Própria.	38

Figura 22 – Circuito regulador de tensão ajustável para 1,5 V. Fonte: Adaptado de Carter (2012).	39
Figura 23 – Circuito Somador de sinais. Fonte: Própria.	39
Figura 24 – Esquemático do sistema de alimentação. Fonte: Própria.	42
Figura 25 – Circuito completo do do filtro e condicionador de sinais. Fonte: Própria.	43
Figura 26 – Gráfico com os sinais de entrada e saída com ruído de 7 kHz simulado. Fonte: Própria.	43
Figura 27 – <i>Layout</i> da placa de condicionamento de sinais. Fonte: Própria.	45
Figura 28 – <i>Layout</i> da placa mãe. Fonte: Própria.	46
Figura 29 – <i>Layout</i> da placa dos sensores. Fonte: Própria.	46
Figura 30 – Sistema de aquisição e condicionamento de sinais. Fonte: Própria.	47
Figura 31 – Ferramentas de teste de desempenho laboratorial. Fonte: Própria.	47
Figura 32 – Formas de onda de entrada e saída aplicando a função de ruído para diferentes tensões. Fonte: Própria.	48
Figura 33 – Formas de Onda de entrada e saída para diferentes frequências e tensões de entrada com canal dois com acoplamento DC. Fonte: Própria.	49
Figura 34 – Formas de Onda de entrada e saída para diferentes frequências e tensões de entrada com canal dois com acoplamento DC. Fonte: Própria.	50
Figura 35 – Formas de onda de entrada e saída para diferentes frequências e tensões de entrada com canal dois com acoplamento AC. Fonte: Própria.	51
Figura 36 – Formas de onda de entrada e saída para diferentes frequências e tensões de entrada com canal dois com acoplamento AC. Fonte: Própria.	52
Figura 37 – Transformadas de Fourier na entrada e saída para uma tensão de 3 V _{pp} e 60 Hz. Fonte: Própria.	53
Figura 38 – Gráfico de Bode obtido experimentalmente. Fonte: Própria.	54
Figura 39 – Ferramentas de teste de desempenho para avaliação experimental do sistema completo.	55
Figura 40 – Formas de onda de saída para teste com o sensor de corrente. Fonte: Própria.	56
Figura 41 – Formas de onda de entrada e saída para teste com o sensor de tensão. Fonte: Própria.	57
Figura 42 – Formas de onda de entrada e saída para teste com o sensor de tensão. Fonte: Própria.	58
Figura 43 – Sistema de aquisição e condicionamento de sinais. Fonte: Própria.	64
Figura 44 – Medição da tensão de alimentação. Fonte: Própria.	64
Figura 45 – Medição do <i>offset</i> . Fonte: Própria.	65
Figura 46 – Conexão do sensor de tensão e corrente. Fonte: Própria.	65

Figura 47 – Trilha da placa de condicionamento de sinais. Fonte: Própria.	66
Figura 48 – Serigrafia da placa de condicionamento de sinais. Fonte: Própria.	66
Figura 49 – Máscara de solda da placa de condicionamento de sinais. Fonte: Própria.	66
Figura 50 – Trilha da placa de sensores. Fonte: Própria.	67
Figura 51 – Serigrafia da placa de sensores. Fonte: Própria.	68
Figura 52 – Máscara de solda da placa de sensores. Fonte: Própria.	69
Figura 53 – Trilha da placa mãe. Fonte: Própria.	70
Figura 54 – Serigrafia da placa mãe. Fonte: Própria.	71
Figura 55 – Máscara de solda da placa mãe. Fonte: Própria.	72

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação das variações de tensão de curta duração.	23
Tabela 2 – Comparações das respostas de filtros passa baixas.	31
Tabela 3 – Valores de RM de acordo com as tensões de alimentação do LV 20-P. .	33
Tabela 4 – Valores de RM de acordo com as tensões de alimentação do LA 55-P. .	34
Tabela 5 – Especificações técnicas do amplificador operacional TL071.	41
Tabela 6 – Consumo de corrente dos componentes da placa de aquisição de dados.	41
Tabela 7 – Largura mínima da trilha de acordo com a corrente que deverá suportar.	44
Tabela 8 – Distância mínima entre trilhas de acordo com a diferença de potencial que estarão sujeitas.	45
Tabela 9 – Correntes de entrada e tensões de saída com os erros correspondentes para o sensor de corrente.	59
Tabela 10 – Tensões de entrada e saída com os erros correspondentes para o sensor de tensão.	59
Tabela 11 – Lista de componentes para placa de condicionamento de sinais.	73
Tabela 12 – Componentes da placa dos sensores.	73
Tabela 13 – Lista de componentes para a placa mãe.	74

Lista de símbolos

V	Tensão Elétrica
V_i	Tensão de Entrada
V_o	Tensão de Saída
I	Corrente Elétrica
R	Resistência Elétrica
Ω	Unidade de Resistência Elétrica
Z	Impedância
Hz	Hertz
ω	Frequência Angular
$H(s)$	Função de Transferência no Domínio de Laplace
dB	Decibel
F	Farad
Q	Fator de Qualidade
K	Ganho
K_c	Ganho na Região de Corte
f_c	Frequência de Corte
f_o	Frequência Natural
f_p	Frequência de Pólos
C	Capacitor

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	18
1.2.0.1	Objetivos Específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Qualidade de Energia	19
2.1.1	Fenômenos que Afetam a Qualidade de Energia	19
2.1.1.1	Transitórios	19
2.1.1.2	Distorções na Forma de Onda	20
2.1.1.2.1	Distorções Harmônicas e Interharmônicas	20
2.1.1.2.2	Offset DC e Notching	21
2.1.1.2.3	Ruídos	22
2.1.1.3	Variações de Tensão de Longa Duração	22
2.1.1.4	Variações de Tensão de Curta Duração	22
2.1.1.5	Flutuações de Tensão	23
2.1.1.6	Desequilíbrios de Tensão	24
2.1.1.7	Variações de Frequência	24
2.2	Aquisição e Condicionamento de Sinais	25
2.2.1	O Teorema da Amostragem	25
2.2.2	Efeito <i>Aliasing</i>	25
2.2.3	Condicionamento de sinais	26
2.2.4	Filtro Passa Baixas	27
2.2.5	Filtro Passa Altas	28
2.2.6	Filtro Passa Faixas	28
2.2.7	Filtro Rejeita Faixas	29
2.2.8	Filtro Passa Baixas com Resposta <i>Butterworth</i>	29
2.2.9	Filtro Passa Baixas com Resposta <i>Chebyshev</i>	30
2.2.10	Filtro Passa Baixas com Resposta <i>Bessel</i>	30
2.2.11	Comparação	31
3	MÉTODOS E RESULTADOS	32
3.1	Sensores	32

3.1.1	Sensor de Tensão	32
3.1.2	Sensor de Corrente	33
3.2	Cálculo da função de Transferência do Filtro Anti-aliasing	34
3.3	O Circuito Atenuador	38
3.4	O Circuito Regulador de Tensão	39
3.5	O Circuito Somador de Tensão	39
3.6	A Escolha do Amplificador Operacional	40
3.7	O Sistema de Alimentação	41
3.8	Simulações	43
3.9	Placa de Circuito Impresso	44
3.9.1	A Largura da Trilha	44
3.9.2	O Espaçamento Entre as Trilhas	45
3.9.3	A Confecção das PCI's	45
3.10	Testes de Desempenho do Sistema	47
3.10.1	Avaliação Experimental da Placa de Condicionamento	47
3.10.2	Avaliação Experimental do Sistema Completo	54
4	CONCLUSÃO	60
4.1	Trabalhos Futuros	60
	REFERÊNCIAS	61
	ANEXOS	63
	ANEXO A – PROCESSO DE CALIBRAÇÃO	64
	ANEXO B – PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	66
	ANEXO C – LISTA DE COMPONENTES	73

1 Introdução

1.1 Justificativa

O modelo regulatório do setor elétrico sofreu várias reestruturações e criação de órgãos no decorrer dos anos, sendo que uma das grandes mudanças foi a desverticalização das empresas de energia, por meio da segmentação em geração, transmissão e distribuição. Tais mudanças conduziram uma competitividade entre os agentes do setor, que agora buscam não apenas garantir o fornecimento de energia, mas também em otimizar o uso dos recursos. Pesquisas na área de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) têm conquistado crescente importância no cenário energético brasileiro e internacional. De fato, distintos fenômenos relacionados à área, normalmente atrelados com desvios ou perda de qualidade da energia elétrica, podem acarretar grandes transtornos para as redes elétricas de transmissão e distribuição, assim como também para diversos grupos de consumidores conectados à rede, sejam eles industriais, comerciais ou residenciais. Qualidade da Energia Elétrica está relacionada com qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência de sinais de tensão e/ou corrente. As características da carga elétrica conectada à rede é um dos fatores que interferem diretamente na QEE.

Ao longo dos anos, a carga do Sistema Elétrico de Potência (SEP) sofreu algumas alterações. Até meados da década de 1970 as cargas elétricas eram predominantemente lineares, isso se deve aos equipamentos nas residências, comercios e indústrias eram, em sua maioria, compostos por resistores, indutores ou capacitores. Com o passar dos anos e com a evolução da eletrônica de potência, mais e mais dispositivos eletrônicos foram criados e suas quantidades aumentaram significativamente em todos os setores. Tais dispositivos possuem a característica de não linearidade, o que significa que a relação entre tensão e corrente não é diretamente proporcional. Assim, fontes chaveadas, inversores de frequência, *soft-starters*, reatores de lâmpadas, dentre outros equipamentos, tem a capacidade de provocar distúrbios no sinal elétrico, afetando, portanto, a qualidade da energia (MEHL, 2012).

A preocupação com a QEE deve-se pelo fato de que os aparelhos e equipamentos são sensíveis as variações do sinal na rede elétrica e, por isso, podem não funcionar de forma adequada. Dessa forma, os efeitos advindos de distúrbios na QEE são diversos, tais como: cintilação luminosa, vibração em motores elétricos, acionamento imprevisto de relés. Em casos extremos, pode-se verificar a interrupção de processos produtivos, com

consequente perda de produção e materiais, em função de interrupções e distúrbios no fornecimento de energia ([DUGAN et al., 1995](#)).

Pragmaticamente, o estudo da qualidade da energia elétrica pode ser dividida em duas vertentes:

- ◊ Qualidade do serviço: a qualidade do serviço está associada à disponibilidade da energia elétrica, sendo considerado os aspectos de gestão e atendimento aos consumidores. Nesse sentido, as agências reguladoras estabelecem metodologias para apurar a continuidade e os tempos de atendimento às ocorrências emergenciais na rede elétrica;
- ◊ Qualidade do produto: vertente relacionada ao suprimento da energia elétrica, o qual deve ser realizado com tensão de magnitude e frequência constante e forma de onda senoidal. Neste contexto, verifica-se que existem diversos fenômenos no sistema elétrico que impactam a tensão disponibilizada aos consumidores, implicando na definição de um conjunto de índices para “quantificar” a qualidade do produto.

Segundo o Módulo 8 - Qualidade da Energia do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) ([ANEEL, 2016](#)), os principais fatores considerados na QEE são:

- ★ Tensão em Regime Permanente;
- ★ Fator de Potência;
- ★ Distorções Harmônicas;
- ★ Desequilíbrios de Tensão;
- ★ Flutuação de Tensão;
- ★ Variação de Frequência;
- ★ Variação de Tensão de Curta Duração.

A medição de grandezas possui várias funções, sendo uma delas o monitoramento de fenômenos físicos. A partir disso é possível realizar uma tomada de decisão, como atuação em sistemas de proteção, chaveamento em linhas de transmissão, atuação de sistemas de controle ou o monitoramento da qualidade de energia.

A elaboração deste trabalho de conclusão de curso irá produzir um sistema para aquisição e condicionamento de sinais de tensão e corrente, que poderá ser utilizado de

forma geral em alguma das aplicações acima citadas ou de forma específica nas disciplinas laboratoriais do curso de Engenharia de Energia na Faculdade do Gama (FGA).

1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral o projeto e construção de um sistema de aquisição e condicionamento de sinais de tensão e corrente.

1.2.0.1 Objetivos Específicos

Projeto e Confecção de placa de aquisição e condicionamento de sinais. Para tal, será realizado as seguintes atividades:

- a) Escolher os sensores de corrente e tensão;
- b) Definir os circuitos de condicionamento;
- c) Definir o sistema de alimentação da placa;
- d) Realizar as montagens e testes.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Qualidade de Energia

Atualmente a avaliação da Qualidade de Energia se tornou uma ferramenta presente em todos os segmentos da sociedade, no setor industrial ou comercial, e de forma indispensável, seja pela forma que seus impactos afetam os custos ou seja pela conscientização de que o recurso tem ficado cada vez mais escasso durante os anos. Para as pessoas a falta de qualidade é percebida principalmente pelas cintilações luminosas nas lâmpadas, falta de fornecimento de energia ou quando um equipamento é danificado. Para as empresas os efeitos são mais severos, pois uma momentânea falta de fornecimento pode prejudicar toda uma cadeia de produção. Tendo em mente que os equipamentos atualmente estão mais sensíveis as perturbações na rede, as cobranças pela maior estabilidade se fizeram presente.

A disponibilidade de energia elétrica, se mostra um salto na qualidade de vida da sociedade, visto a diversidade de produtos eletroeletrônicos no cotidiano que funcionam com energia elétrica. É sabido que as cargas eletrônicas provocam maiores distúrbios na rede elétrica, com isso manter a qualidade de energia dentro de níveis adequados têm-se tornado cada vez mais difíceis. Esses níveis são regulamentados pelo PRODIST-Módulo 8, que especifica os indicadores de QEE sobre o aspecto da qualidade do serviço e a qualidade do produto, apenas a qualidade do produto será abordado neste trabalho.

2.1.1 Fenômenos que Afetam a Qualidade de Energia

Aqui serão descritos os principais fenômenos que afetam a QEE e que estão previstos no Módulo 8 do PRODIST.

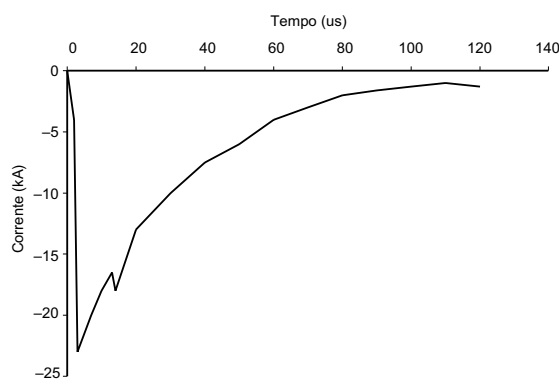
2.1.1.1 Transitórios

Os transitórios são fenômenos eletromagnéticos oriundos de alterações súbitas nas condições de operação de um sistema de energia elétrica. Sua duração geralmente é curta, mas de extrema importância para dimensionamentos de equipamentos, pois os submete a grandes solicitações de tensão e/ou corrente. Basicamente existem dois tipos de transitórios:

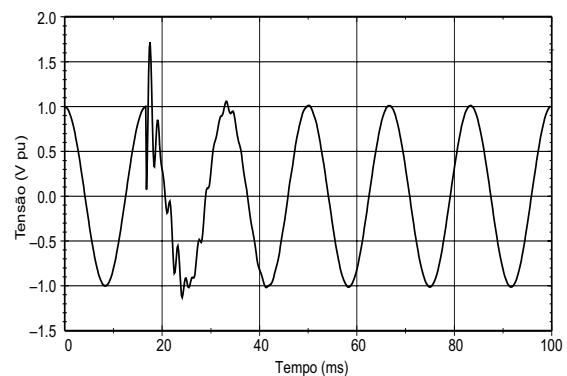
Transitório impulsivo: É uma mudança súbita na condição de regime perma-

nente de tensão, corrente ou ambas, caracterizado por impulsos unidimensionais positivos ou negativos onde é importante observar seus tempos de crescimento e decaimento, esse distúrbio é geralmente provocado por descargas atmosféricas.

Transitório oscilatório: É uma mudança súbita na condição de regime permanente de tensão, corrente ou ambas que inclui valores de impulsos unidirecionais de polaridade positiva e negativa. Um transiente desse tipo tem duração média de dezenas de milissegundos, pode ser subdividido em oscilatórios de baixa, média e alta frequência e são provocados por eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores, e outras (DUGAN et al., 1995).



(a) Transitório impulsivo causado por uma corrente de raio.



(b) Transitório oscilatório causado pela energização de um banco de capacitores.

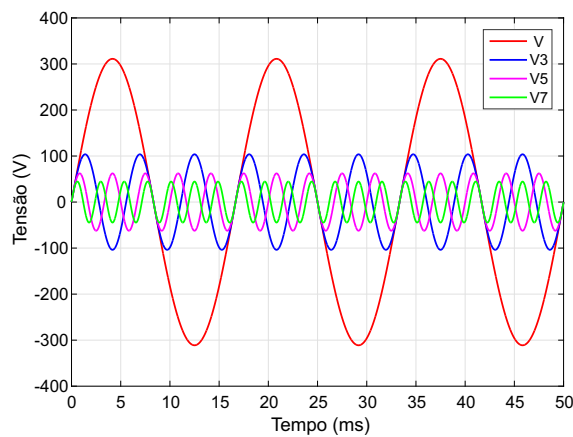
Figura 1 – Exemplos de transitórios. Fonte: Adaptado de Dugan et al. (1995).

2.1.1.2 Distorções na Forma de Onda

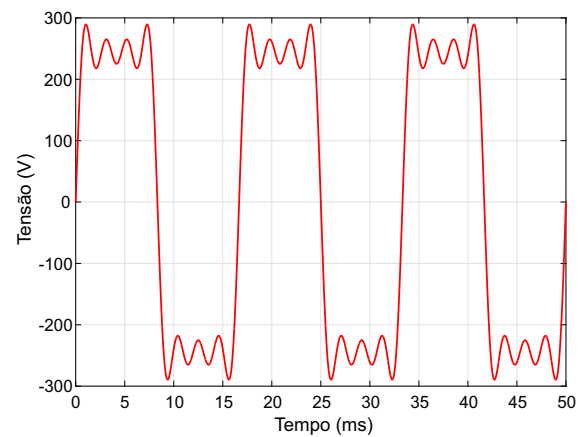
As distorções na forma de onda são definidas como um desvio em regime permanente a partir de uma onda puramente senoidal, na frequência fundamental e caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral (DUGAN et al., 1995).

2.1.1.2.1 Distorções Harmônicas e Interharmônicas

As distorções harmônicas são classificadas em **harmônicos** e **interharmônicos**. Os **harmônicos** são deformações no sinal puramente senoidal (tensão ou corrente) causadas pela combinação de outros sinais com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental. Os **interhamônicos** são deformações no sinal puramente senoidal (tensão ou corrente) causadas pela combinação de outros sinais com frequências não múltiplas da frequência fundamental (VELASCO, 2007; DUGAN et al., 1995). A Figura 2 exemplifica um sinal composto por uma onda em frequência fundamental sobreposta a algumas componentes harmônicas.



(a) Frequência fundamental e harmônicos.



(b) Resultado da distorção dos harmônicos.

Figura 2 – Componentes harmônicos de 3ª, 5ª e 7ª ordens. Fonte: Própria.

2.1.1.2.2 Offset DC e Notching

Notching (Recortes) é uma perturbação de tensão periódica causada por transições sucessivas e bruscas de tensão quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Os componentes de frequência associados podem ser bastante altos. A Figura 3b mostra um exemplo de *notching* de tensão de um conversor trifásico onde a perturbação ocorre na mudança entre fases causando curto-circuitos momentâneos (DUGAN et al., 1995).

Offset é o efeito causado pela presença de uma componente contínua de tensão e/ou corrente em um sistema elétrico de corrente alternada provocando o deslocamento da tensão média no eixo. A Figura 3a apresenta um exemplo de um sinal com um offset DC.

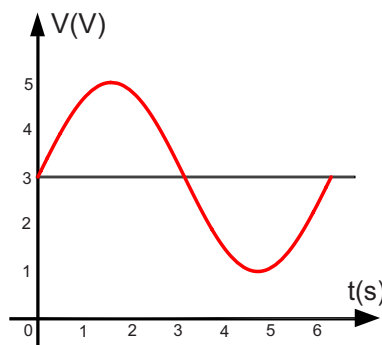
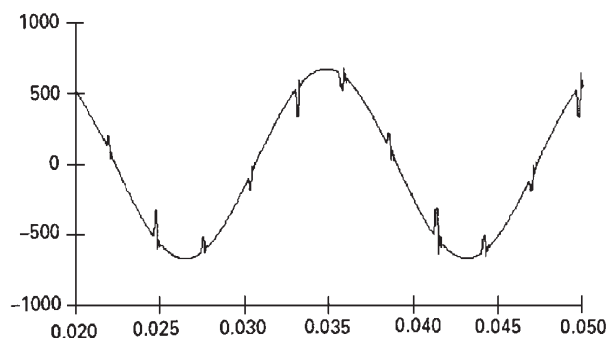
(a) Exemplo de *offset* para um sinal alternado de 2V de amplitude somado a um contínuo de 3V. Fonte: Própria.(b) Exemplo de *notching* de tensão de um conversor trifásico. Fonte: (DUGAN et al., 1995).

Figura 3 – Efeitos de offset e notching.

2.1.1.2.3 Ruídos

Os ruídos são sinais elétricos indesejados, contendo uma faixa espectral inferior a 200 kHz , as quais são sobrepostos à tensão ou corrente causando alterações na onda puramente senoidal. Eles podem ser causados por chaveamento de equipamentos eletrônicos de potência, radiações eletromagnéticas, circuitos de controle, fontes de alimentação chaveadas e outros, conforme exemplificado na Figura 4 (DUGAN et al., 1995).

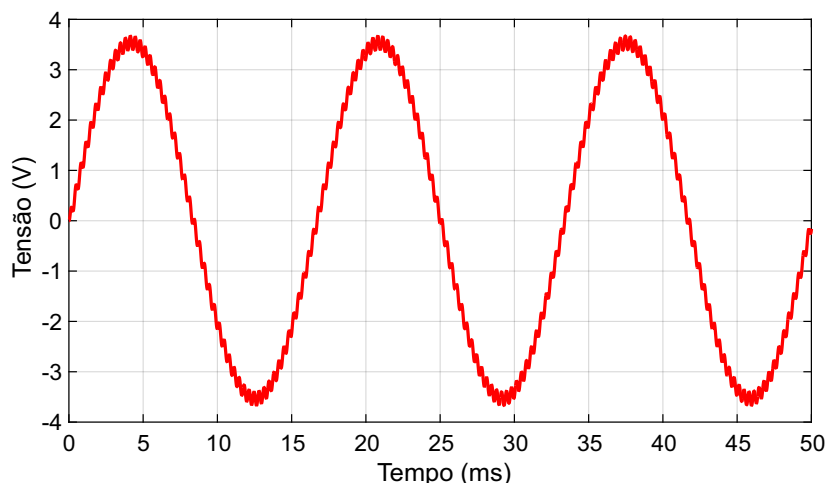


Figura 4 – Presença de ruídos em um sinal alternado senoidal. Fonte: Própria.

2.1.1.3 Variações de Tensão de Longa Duração

As Variações de Tensão de Longa Duração (VTLD), são variações no valor da tensão eficaz com duração superior a três minutos, sendo consideradas distúrbios em regime permanente. Elas são classificadas em **sobretensão** quando ocorre um acréscimo no valor eficaz da tensão maior que 10%, normalmente são resultados de desligamentos de grandes cargas, energização de bancos de capacitores ou o ajuste incorreto da posição do comutador em transformadores, **subtensão** quando ocorre um decréscimo no valor eficaz da tensão maior que 10% e geralmente são provocados por fatores opostos aos que causam sobretensão, e por fim, **interrupção sustentada**, quando o valor da tensão eficaz é nulo por mais de um minuto, onde geralmente as interrupções desse tipo são permanentes e necessitam de intervenção manual de uma equipe emergencial, afim de restabelecer o fornecimento de energia (DUGAN et al., 1995).

2.1.1.4 Variações de Tensão de Curta Duração

As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD), são variações significativas na amplitude de tensão que tem duração momentânea ou temporária causadas tipicamente

por faltas, energizações ou desenergizações de grandes cargas. A regulamentação e classificação é feita segundo o PRODIST-Módulo 8 considerando uma a duração de tempo e amplitude da tensão, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das variações de tensão de curta duração.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: Adaptado de [ANEEL \(2016\)](#).

2.1.1.5 Flutuações de Tensão

As flutuações de tensão são variações na tensão nominal compreendidas na faixa de 0,9 e 1,1 pu, são caracterizadas como uma série de pequenas e rápidas variações de forma aleatória ou contínua. Dentre as manifestações das flutuações de tensão pode-se destacar o efeito de cintilação (*flicker*) visto nas lâmpadas dado pela variação do fluxo luminoso. O sinal de cintilação é definido pela magnitude eficaz da variação de tensão, dada em porcentagem do sinal fundamental, o efeito de cintilação nas lâmpadas é produzido pelo sinal de cintilação que possui frequência de 0 a 30 Hz, nesta faixa o olho humano é sensível a variação luminosa o que tornou possível a observação do efeito ([DUGAN et al., 1995](#); [MEHL, 2012](#)).

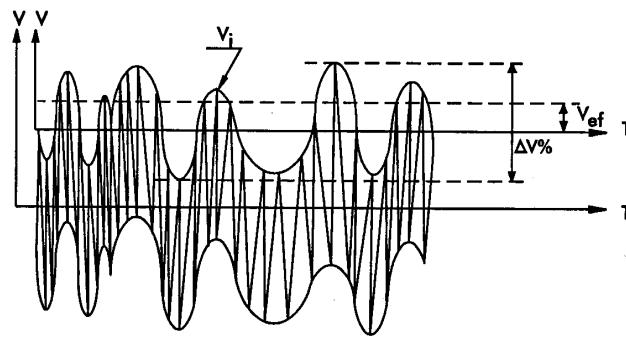


Figura 5 – Variação da tensão ocasionada pela operação de um forno a arco. Fonte: (MEHL, 2012).

2.1.1.6 Desequilíbrios de Tensão

Os desequilíbrios de tensão são quaisquer variações na amplitude de tensão entre as três fases ou defasagem elétrica de 120° em um sistema trifásico. As principais fontes de desequilíbrios são cargas não uniformemente distribuídas nas fases do sistema de alimentação (ANEEL, 2016).

2.1.1.7 Variações de Frequência

As variações de frequência são definidas como uma variação da frequência fundamental do sistema a partir do seu valor nominal, são causadas por perdas de geração ou excesso de carga podendo causar danos nos geradores e palhetas das turbinas. A frequência está vinculada com a rotação dos geradores síncronos e pode variar caso não haja o equilíbrio entre geração e carga, que no Brasil é realizado pelo ONS. O PRODIST-Módulo 8 especifica que a variação de frequência deve estar compreendida entre 59.5 Hz e 60.1 Hz nas condições normais de operação em regime permanente. No caso de distúrbios na rede de distribuição ou geração ele ainda especifica outros limites de tempo e frequências (VELASCO, 2007; DUGAN et al., 1995; ANEEL, 2016).

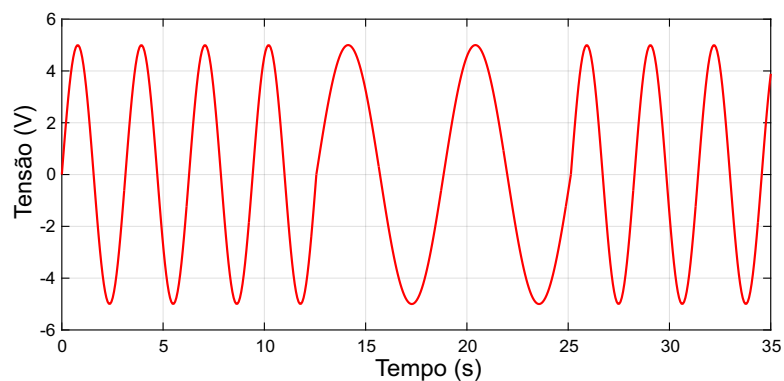


Figura 6 – Exemplo da variação de frequência ao longo do tempo. Fonte: Própria.

2.2 Aquisição e Condicionamento de Sinais

2.2.1 O Teorema da Amostragem

As grandezas da natureza como velocidade, temperatura, tensão e corrente elétrica são representadas por funções contínuas no tempo, isso quer dizer que existe um valor dessa grandeza para qualquer infinitésimo de tempo. No entanto, nos sistemas de medição digitais essas grandezas são discretizadas (descontínua no tempo), ou seja, representadas tomando-se uma determinada quantidade de amostras, de forma que ainda seja possível representar este sinal. Para que a discretização ocorra de forma eficaz, a forma que isso ocorre deve acontecer seguindo o teorema da amostragem, o qual indica que, deve haver uma quantidade mínima de amostras do sinal contínuo no tempo para que ele possa ser representado discretamente de forma fiel (OPPENHEIM; WILLSKY; NAWAB, 2010).

Segundo o teorema da amostragem, tomando-se uma sequência de amostras uniformemente espaçadas por unidade de tempo, o sinal apenas poderá ser reconstruído perfeitamente se as amostras forem tomadas com uma frequência mais alta do que àquelas existentes no sinal. Nesse contexto, a taxa com que são obtidas as amostras é chamada de frequência de amostragem (ω_s) e ela deve ser maior do que duas vezes a frequência mais alta do sinal (ω_m) que se quer amostrar (OPPENHEIM; WILLSKY; NAWAB, 2010).

$$\omega_s > 2\omega_m \quad (2.1)$$

Segundo Oppenheim, Willsky e Nawab (2010, p.307), “A frequência ($2\omega_m$), que, conforme o teorema da amostragem, deve ser menor que a frequência de amostragem, comumente é conhecida como taxa de Nyquist.”

2.2.2 Efeito *Aliasing*

Quando a frequência de amostragem não é suficientemente alta, ou seja, de acordo com o teorema da amostragem, a condição $\omega_s > 2\omega_m$ não é atendida, esse sinal não pode ser reconstruído de forma fiel. Tal diferença entre o sinal real e o reconstruído é conhecido como efeito *aliasing*.

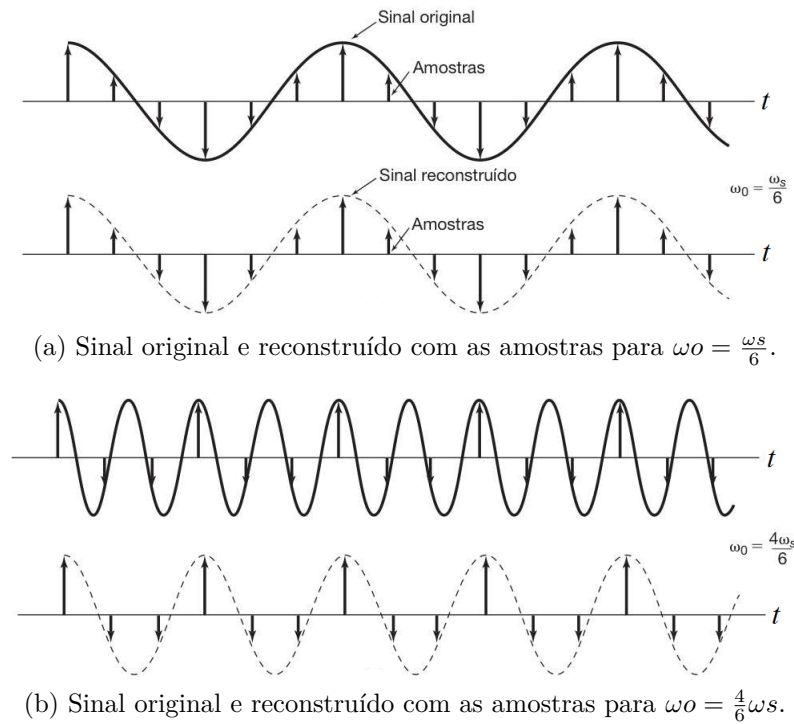


Figura 7 – Sinais originais e reconstruídos para diferentes taxas de amostragem. Fonte: (OPPENHEIM; WILLSKY; NAWAB, 2010).

Na Figura 7a o sinal pode ser reconstruído de forma fiel pois a frequência de amostragem (ω_s) é seis vezes maior que a frequência do sinal (ω_m), já para a Figura 7b o sinal reconstruído é diferente pois a frequência de amostragem é apenas três meios da frequência do sinal original, com isso temos o efeito *aliasing*.

2.2.3 Condicionamento de sinais

Na eletrônica analógica o processamento de sinais elétricos é feito utilizando elementos denominados filtros. De acordo com Boylestad (2004, p.693) “Qualquer combinação de dispositivos passivos (R, L e C) e/ou (transistores e amplificadores operacionais) projetada para selecionar ou rejeitar uma faixa de frequência é denominada filtro”.

Os filtros são circuitos capazes de permitir a passagem de determinadas frequências e bloquear outras removendo informações indesejadas. Filtros que contêm apenas dispositivos passivos (R, L e C) são considerados filtros passivos, ao passo que os que contêm dispositivos ativos (transistores e amplificadores operacionais) associados com dispositivos passivos são considerados filtros ativos (BOYLESTAD, 2004).

O tipo de filtro é caracterizado pela sua resposta em frequência, que pode ser visualizada em um gráfico do ganho de tensão em relação a frequência, conhecido também

como diagrama de *Bode*. Por esse diagrama é possível analisar o comportamento do filtro por meio das suas regiões descritas a seguir:

- Faixa (banda) de passagem: Faixa onde se permite a passagem de frequências de interesse.
- Faixa (banda) de rejeição: Faixa onde se bloqueia a passagem das frequências indesejadas.
- Faixa (banda) de transição: Intervalo entre a faixa de passagem e de rejeição.

A figura 8 mostra uma resposta em frequência de um filtro compreendido entre as regiões reais consideradas como passagem, transição (entre f_c e f_s) e atenuação.

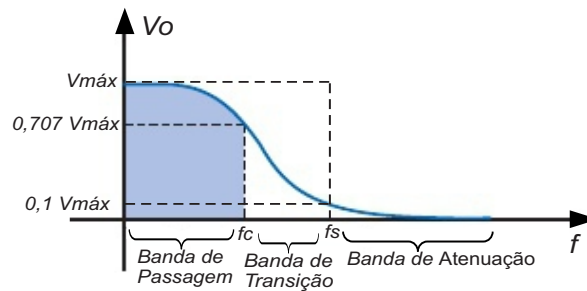


Figura 8 – Diagrama de *Bode* de um filtro passa baixas real mostrando suas regiões de análise. Fonte: Adaptado de [Boylestad \(2004\)](#).

Outro parâmetro importante é a ordem do filtro, a qual está associada à quantidade de pólos na função de transferência e indica o poder de atenuação de frequências indesejadas. Sob o ponto de vista prático, quanto maior a ordem de um filtro passivo ou ativo, maior é a complexidade de implementação do circuito ([MALVINO; BATES, 2007](#), vol.2).

2.2.4 Filtro Passa Baixas

Este filtro consiste em uma faixa de passagem limitada pela região de frequência de zero até a frequência de corte. A medida que aumenta a frequência, os sinais passam pelo filtro com a mesma amplitude inicial. Ao aproximar-se de f_c eles começam a ser atenuados aos poucos até o valor de $0,707$ de sua amplitude inicial, em seguida a atenuação é maior conforme aumenta frequência, até serem completamente atenuados.

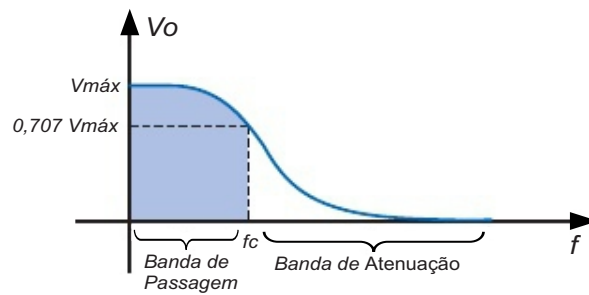


Figura 9 – Diagrama de *Bode* de um filtro passa baixa real. Fonte: Adaptado de [Boylestad \(2004\)](#).

2.2.5 Filtro Passa Altas

Este filtro consiste em uma faixa de passagem a partir da frequência de corte. Conforme a frequência varia a partir do zero, os sinais são atenuados a uma alta taxa. Conforme suas frequências se aproximam de f_c a taxa diminui, em seguida já estando na faixa de passagem, a taxa de atenuação continua a diminuir até que as amplitudes dos sinais sejam iguais aos de entrada, para frequências superiores os sinais passam integralmente.

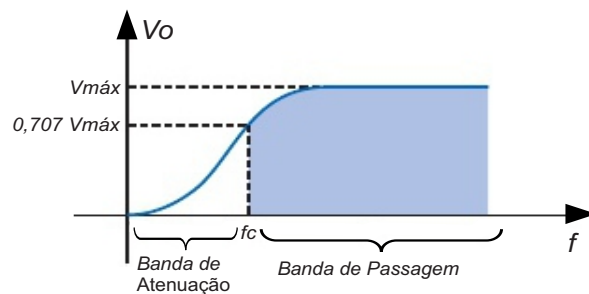


Figura 10 – Diagrama de *Bode* de uma filtro passa alta real. Fonte: Adaptado de [Boylestad \(2004\)](#).

2.2.6 Filtro Passa Faixas

Este filtro consiste em permitir a passagem de frequências em uma região limitada de uma frequência inicial f_1 (corte inferior) até uma frequência final f_2 (corte superior) e atenuando as demais frequências dos sinais. Ao variar a frequência a partir do zero, os sinais são atenuados a uma alta taxa, ao se aproximar de f_1 a taxa de atenuação diminui, assim como são bastante atenuados a partir de f_2 . A região compreendida entre f_1 e f_2 que é a região de interesse os sinais são pouco atenuados até chegar em f_0 onde a amplitude dos sinais é máxima.

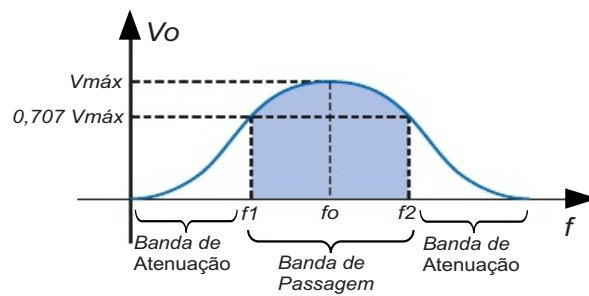


Figura 11 – Diagrama de *Bode* de um filtro passa faixa real. Fonte: Adaptado de [Boylestad \(2004\)](#).

2.2.7 Filtro Rejeita Faixas

Um filtro rejeita faixa consiste em rejeitar uma faixa de frequência em uma região dada pela frequência inicial f_1 e frequência final f_2 e permite a passagem nas demais regiões. Ao aumentar a frequência a partir do zero o sinal é pouco atenuado até chegar em f_1 . Em seguida na banda de atenuação os sinais são bastante atenuados até a frequência de atenuação máxima em f_0 , depois a taxa diminui até f_2 , e em seguida na banda de passagem a taxa continua a diminuir, mas agora lentamente, até atingir a amplitude máxima do sinal, os sinais com frequências superiores passam integralmente.

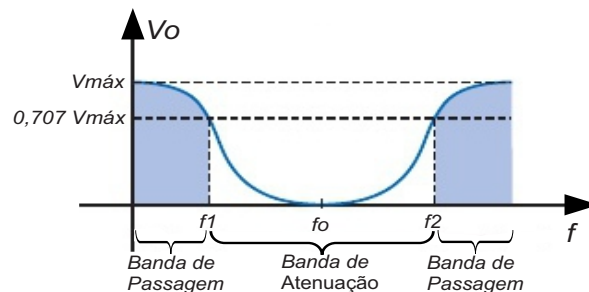


Figura 12 – Diagrama de *Bode* de uma filtro rejeita faixa real. Fonte: Adaptado de [Boylestad \(2004\)](#).

2.2.8 Filtro Passa Baixas com Resposta *Butterworth*

O filtro com resposta *Butterworth* tem como característica principal uma curva maximamente plana na região de passagem comparada com outras aproximações e uma taxa de decaimento relativamente lenta. De acordo com a Figura 13 este filtro possui baixo deslocamento de fase em baixas frequências e pouca variação da amplitude em um transiente de tempo ([MALVINO; BATES, 2007](#), vol.2).

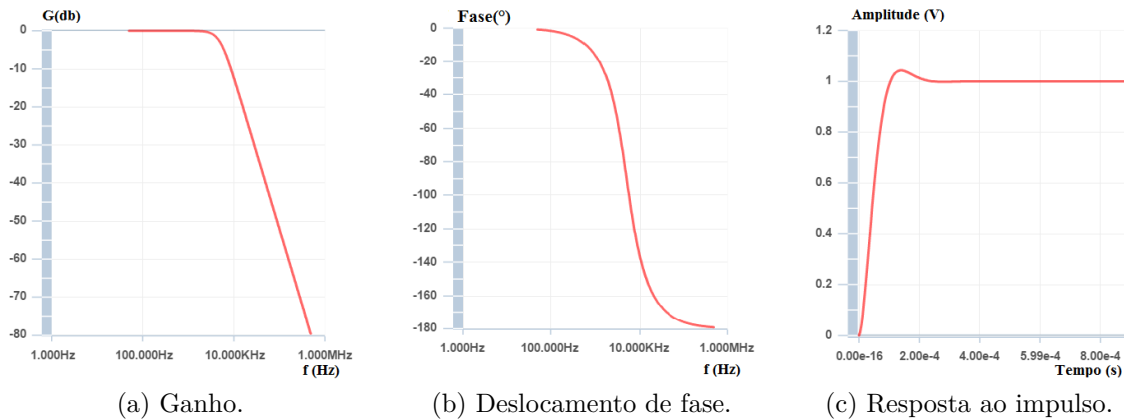


Figura 13 – Respostas em frequência do filtro *Butterworth* para $f_c = 5 \text{ kHz}$ segunda ordem. Fonte: Própria.

2.2.9 Filtro Passa Baixas com Resposta *Chebyshev*

O filtro com resposta *Chebyshev* tem como característica principal um decaimento rápido na região de transição em comparação com outras topologias. No entanto, ele possui uma oscilação na banda de passagem principalmente na região próxima a frequência de corte. De acordo com a Figura 14 este filtro possui pouca variação da fase para baixas frequências e uma considerável variação da amplitude com um transiente de tempo (MALVINO; BATES, 2007, vol.2).

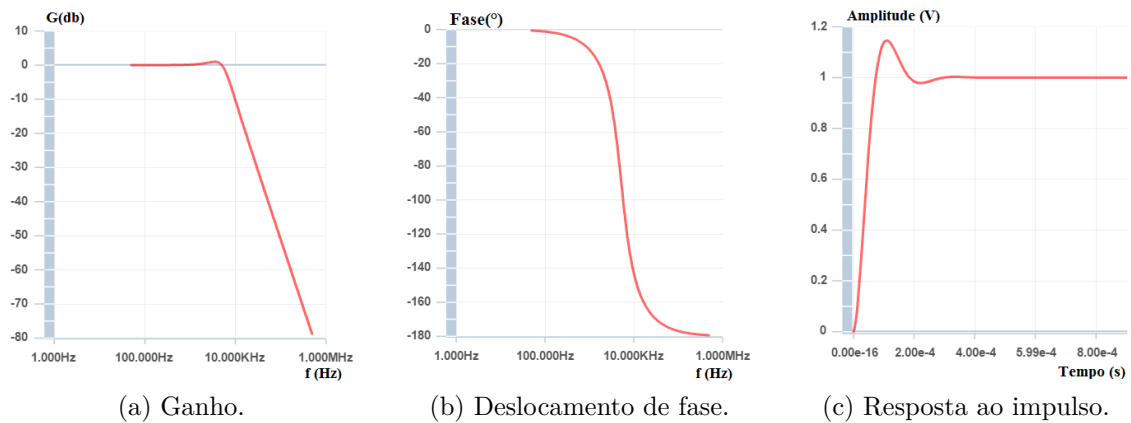


Figura 14 – Respostas em frequência do filtro *Chebyshev* para $f_c = 5 \text{ kHz}$ segunda ordem. Fonte: Própria.

2.2.10 Filtro Passa Baixas com Resposta *Bessel*

O filtro com resposta *Bessel* tem como característica principal um deslocamento linear de fase na região de passagem comparado com outras aproximações e uma resposta

plana, entretanto, seu decaimento é mais lento que a resposta *Butterworth*. De acordo com a Figura 15 este filtro possui baixa variação da fase em baixas frequências e praticamente nenhuma variação da amplitude com um transiente de tempo (MALVINO; BATES, 2007, vol.2).

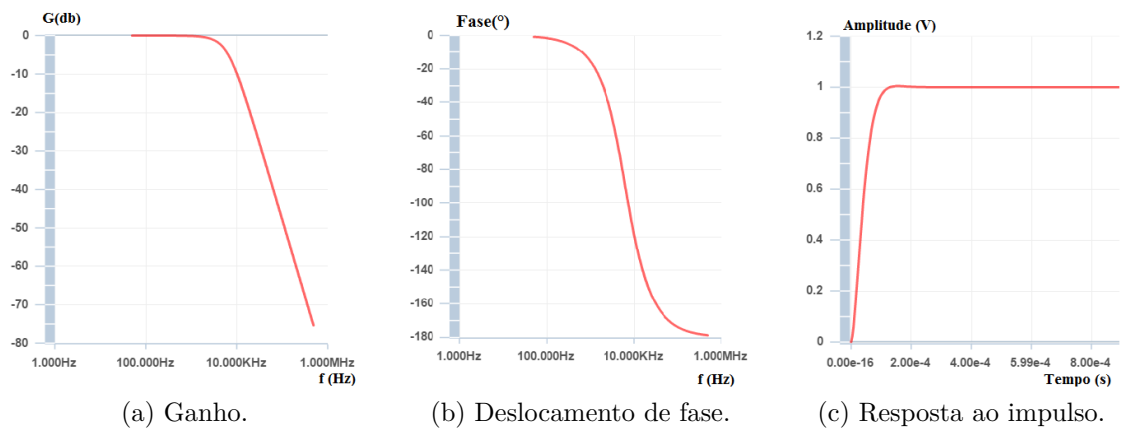


Figura 15 – Respostas em frequência do filtro *Chebyshev* para $f_c = 5\text{ kHz}$ segunda ordem.
Fonte: Própria.

2.2.11 Comparação

A Tabela 2 reúne as principais características das principais respostas dos filtros passa baixas, de forma a tornar fácil a seleção.

Tabela 2 – Comparações das respostas de filtros passa baixas.

Aproximações de Filtro				
Tipo	Banda de Passagem	Banda de Corte	Decaimeto	Resposta ao Degrau
<i>Butterworth</i>	Plana	Monotônica	Bom	Bom
<i>Chebyshev</i>	Com ondulações	Monotônica	Muito Bom	Ruim
<i>Bessel</i>	Plana	Monotônica	Ruim	Melhor

Fonte: Adaptado de Malvino e Bates (2007, p.238, vol.2).

3 Métodos e Resultados

Este capítulo trata de forma detalhada as partes que compõem o sistema, como equacionamento utilizando as leis de *Kirchhoff* dos nós, cálculo das funções de transferência dos circuitos e a escolha dos componentes que os compõem.

3.1 Sensores

3.1.1 Sensor de Tensão

O sensor de tensão escolhido é um transdutor LV 20-P produzido pela empresa LEM que faz a medição com princípio de funcionamento baseado no efeito *Hall*, podendo ser utilizado para medições de tensões alternadas (C.A.), contínuas (C.C.) e pulsantes. Além disso ele possui um isolamento galvânico entre o circuito primário (alta potência) e secundário (baixa potência) que traz como vantagem isolamento elétrico entre as partes e consequentemente proteção do circuito medidor contra surtos de tensão.

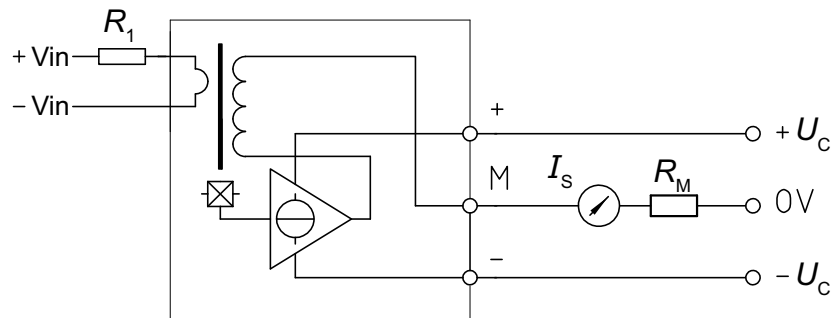


Figura 16 – Diagrama de conexões do LV 25-P. Fonte: Adaptado de [LEM \(2014\)](#).

De acordo com a Figura 16 as conexões $+U_c$ e $-U_c$ são responsáveis pela alimentação, a conexão M pelo resultado de medição e as conexões +HV e -HV correspondem aos terminais que devem se conectar ao ponto de medição. O resistor R_1 deve ser selecionado de forma que a corrente que flui através do sensor seja proporcional à tensão a ser medida. Com isso R_1 deve ser calculado de tal forma que, para tensão nominal, a corrente que flui através dele seja de 10 mA ([LEM, 2014](#)).

Pode-se calcular R_1 da seguinte forma:

$$R_1 = \frac{V_{in} (V)}{0,01 (A)} \quad (3.1)$$

O resistor de medição R_M é definido pelo fabricante em virtude da tensão de alimentação como pode ser visto a seguir:

Tabela 3 – Valores de R_M de acordo com as tensões de alimentação do LV 20-P.

Alimentação (V)	Corrente Máxima (mA)	R_M Mínimo (Ω)	R_M Máximo (Ω)
± 12 (C.C.)	± 10	30	190
± 15 (C.C.)	± 10	100	350

Fonte:([LEM, 2014](#)).

A seguir outras características técnicas:

- * Temperatura ambiente de operação: 0 a $+70$ °C;
- * Corrente nominal de saída: 25 mA (eficaz);
- * Faixa de medição de tensão: 10 a 500 V;
- * Exatidão: $\pm 1,1\%$.

3.1.2 Sensor de Corrente

O sensor de corrente utilizado é um LA 55-P produzido pela empresa LEM, capaz de realizar medições em correntes alternadas (C.A.), contínuas (C.C.) e pulsantes. Assim como o sensor de tensão ele traz um isolamento galvânico entre primário e secundário capaz de proteger o circuito medidor contra surtos de corrente e curto-circuito.

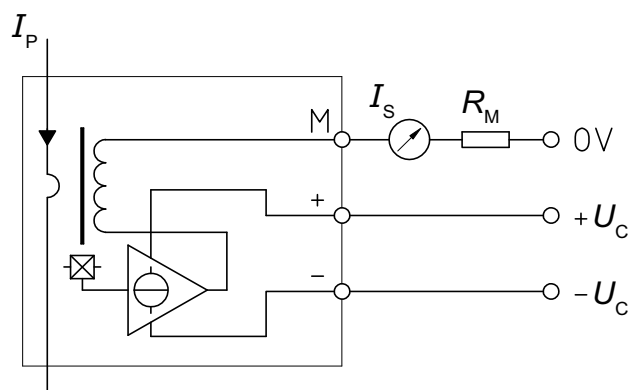


Figura 17 – Diagrama de conexões do LA 55-P. Fonte:([LEM, 2015](#)).

Como pode ser visto na Figura 17 o sensor LA 55-P é alimentado pelos terminais $+U_C$ e $-U_C$ com tensão de 15 V, no terminal M é inserido um resistor R_M em série para

transformar um sinal de corrente em um sinal de tensão, sendo seu valor definido pelo fabricante em função da tensão de alimentação do sensor. A Tabela 4 mostra os valores de RM de acordo com a tensão de alimentação e temperatura ambiente de 70 °C.

Tabela 4 – Valores de RM de acordo com as tensões de alimentação do LA 55-P.

Alimentação (V)	Corrente Máxima (mA)	RM Mínimo (Ω)	RM Máximo (Ω)
± 12 (C.C.)	± 10	10	100
± 15 (C.C.)	± 10	50	160

Fonte: (LEM, 2015).

A seguir outras características técnicas:

- * Temperatura ambiente de operação: -40 a +85 °C;
- * Corrente nominal de saída: 50 mA (eficaz);
- * Faixa de medição: 0 a 50 A (eficaz);
- * Exatidão: 0,90%.

3.2 Cálculo da função de Transferência do Filtro *Anti-aliasing*

O sinal analógico necessita passar por diversas etapas para que seja possível processá-lo. A Figura 18 mostra o processo em etapas.

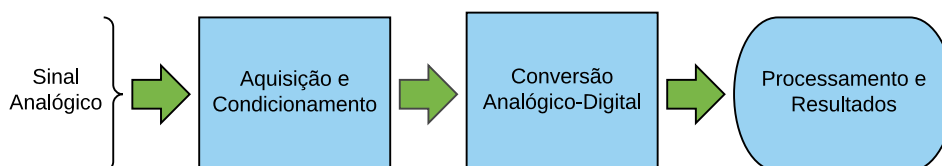


Figura 18 – Processo do sistema de monitoramento de qualidade de energia. Fonte: Própria.

O processo de aquisição e condicionamento de sinais é uma parte importante deste trabalho, sendo capaz de eliminar os ruídos que estão sobrepostos ao sinal de interesse e condicioná-lo para um processamento e análise digital. A Figura 19 mostra de uma forma simples as etapas e o que acontece com o sinal desde a medição dos sensores até estar pronto para o microcontrolador.

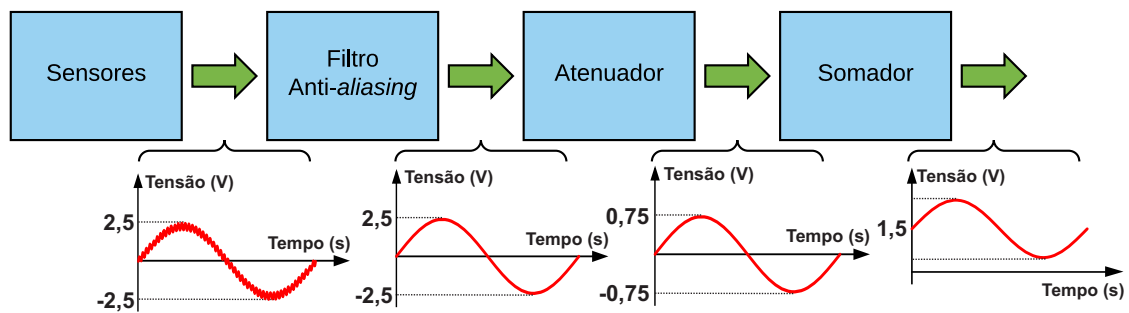


Figura 19 – Processo de aquisição e condicionamento de sinais. Fonte: Própria.

O tipo de filtro escolhido para este trabalho foi um passa baixa com aproximação *Bessel*. A primeira consideração foi a frequência de interesse de 60 Hz , por isso um filtro passa baixas. Em seguida a escolha se baseou nos seguintes aspectos:

- ▷ **Ordem:** Utilizou-se um filtro de segunda ordem devido a maior complexidade de filtros de ordem superior tanto para a obtenção da função de transferência quanto para a implementação do circuito.
- ▷ **Resposta:** Uma resposta não plana tem como resultado ganhos maiores em frequências maiores, isso provocaria um ganho maior nos ruídos e harmônicos, pois eles possuem frequências bem maiores que a de interesse, resultando uma distorção maior na saída do filtro. Os filtros com resposta *Butterworth* e *Bessel* como pode ser visto nas Figuras 13 e 15, possuem uma resposta plana na região de passagem, a resposta *Butterworth* é ainda mais plana que a *Bessel*, no entanto, a resposta *Bessel* tem como vantagem uma resposta ao degrau plana, resultando em menor distorção do sinal na saída.
- ▷ **Topologia:** Utilizou-se a topologia *Sallen-Key*, conforme Figura 20, pois ela é simples e de fácil implementação da função de transferência.

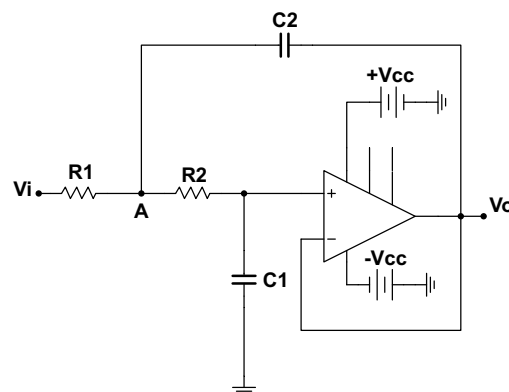


Figura 20 – Circuito do filtro Anti-aliasing com topologia *Sallen Key*. Fonte: Própria.

Utilizando a Lei de *Kirchhoff* dos nós calcula-se a função de transferência do circuito da Figura 20:

$$H(s) = \frac{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + s \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2 C_2} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.2)$$

Segundo Dorf e Svoboda (2013, p.808) "a função de transferência de um filtro de segunda ordem é de acordo com a equação 3.3".

$$H(s) = \frac{K \omega_o^2}{s^2 + \frac{\omega_o}{Q} s + \omega_o^2} \quad (3.3)$$

Comparando a função de transferência obtida com a equação 3.3 pode-se calcular a frequência de pólos da seguinte maneira:

$$\omega_o^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (3.4)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.5)$$

$$2\pi f_p = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.6)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.7)$$

Fazendo $R_1 = R_2 = R$ tem-se:

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 C_2}} \quad (3.8)$$

Tem-se ainda da equação que:

$$\frac{\omega_o}{Q} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_2} \quad (3.9)$$

$$Q = \frac{R_1 R_2 C_2}{R_1 + R_2} \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.10)$$

$$Q = \frac{C_2}{2\sqrt{C_1 C_2}} \quad (3.11)$$

$$K \omega_o^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (3.12)$$

$$K \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (3.13)$$

$$K = 1 \quad (3.14)$$

A largura de banda dada pela diferença entre as frequências de -3 dB de corte superior e inferior, assim:

$$BW = f_{cs} - f_{ci} \quad (3.15)$$

Para um filtro passa baixas:

$$BW = f_c \quad (3.16)$$

$$Q = \frac{f_o}{BW} = \frac{f_o}{f_c} \quad (3.17)$$

$$f_o = K o f_p \quad (3.18)$$

Ko é o ganho na região de passagem, como ele é unitário temos:

$$f_o = f_p \quad (3.19)$$

$$f_c = K c f_o \quad (3.20)$$

$$f_c = K c f_p \quad (3.21)$$

Segundo [Malvino e Bates \(2007, p.203, vol.2\)](#), "uma resposta *Bessel* possui um fator de Qualidade $Q = 0,577$ e ganho $Kc = 0,786$ ". Baseado em [3.8](#) e [3.21](#), obtém-se [3.22](#).

$$f_c = \frac{Kc}{2\pi R \sqrt{C_1 C_2}} \quad (3.22)$$

Definindo a frequência de corte em 5 kHz e o o valor de $R = 2,2 \text{ k}\Omega$

$$C_1 C_2 = \left(\frac{0,786}{2\pi R f_c} \right)^2 \quad (3.23)$$

$$C_1 C_2 = \left(\frac{0,786}{2\pi \cdot 2200 \cdot 5000} \right)^2 \quad (3.24)$$

$$C_1 C_2 = 1,293302107^{-16} \quad (3.25)$$

Definindo o valor de $C_1 = 10 \text{ nF}$ temos que:

$$C_2 = 12,9333 \text{ nF} \quad (3.26)$$

Como não existe um capacitor com essa capacitância comercialmente, pode-se aproximar C_2 associando 4 capacitores em paralelo, sendo um de 10 nF , e outros três de 1 nF , obtendo:

$$C_2 = 13 \text{ nF} \quad (3.27)$$

3.3 O Circuito Atenuador

De forma que o sistema de condicionamento de sinais possa ser utilizado em uma ampla gama de dispositivos, fixou-se que a placa de aquisição e condicionamento de dados deve disponibilizar um sinal de, no máximo, $3,3 \text{ V}$, uma vez que este é o valor máximo de entradas analógicas de alguns modelos de microcontroladores. Para que isso aconteça será feita uma atenuação do sinal após o filtro para que ao não ultrapasse o limite desejado. A Figura 21 apresenta o circuito atenuador.

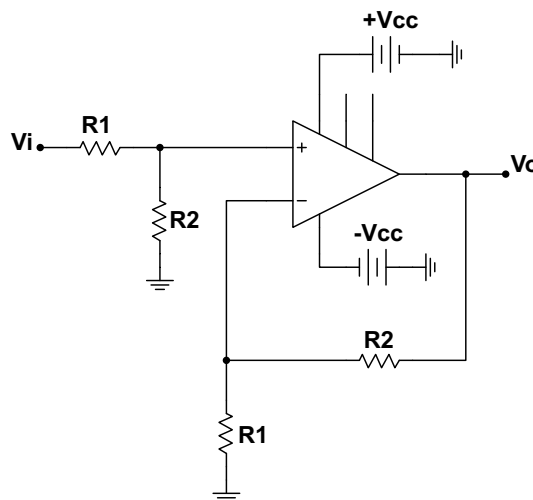


Figura 21 – Circuito atenuador de tensão. Fonte: Própria.

$$V_o = V_i \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3.28)$$

Para este projeto, é necessário atenuar o sinal em 70%, implicando, portanto, em $R_1 = 33 \text{ k}\Omega$ e $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$.

3.4 O Circuito Regulador de Tensão

Este circuito é responsável por proporcionar uma tensão de $1,5\text{ V}$ para ser somado ao sinal do filtro anti-*aliasing*. O trimpot a ser utilizado será multivoltas para obtenção de um ajuste fino da tensão.

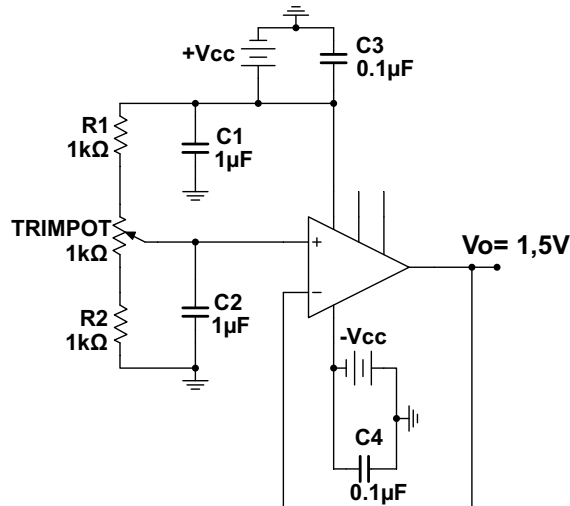


Figura 22 – Circuito regulador de tensão ajustável para $1,5\text{ V}$. Fonte: Adaptado de [Carter \(2012\)](#).

3.5 O Circuito Somador de Tensão

O circuito somador tem a função de deixar o sinal apenas positivo para o microcontrolador, para isso o sinal advindo do circuito atenuador será somado com $1,5\text{ V (C.C.)}$.

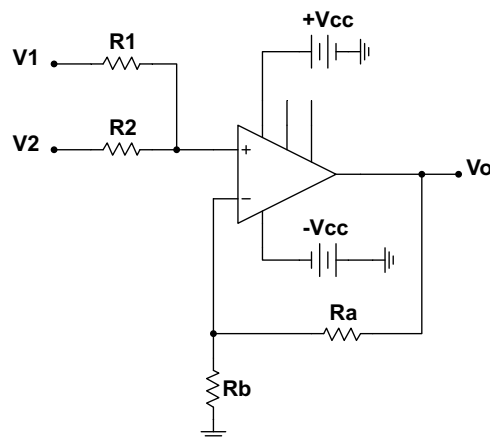


Figura 23 – Circuito Somador de sinais. Fonte: Própria.

$$V_o = (1 + \frac{Ra}{Rb}) (\frac{V_1 R_2 + V_2 R_1}{R_1 + R_2}) \quad (3.29)$$

De acordo com a equação 3.29 , escolhendo todos os resistores com valores iguais obtemos um ganho unitário, logo $R_1 = R_2 = Ra = Rb = 1 \text{ k}\Omega$.

3.6 A Escolha do Amplificador Operacional

A escolha do amplificador operacional deve levar em consideração os seguinte critérios (BAKER; MICROCHIP, 2003).:

1. Especificações principais:

- * Largura de banda: A largura de banda deve ser de cem vezes superior a frequência de corte do filtro, conforme equação 3.30;

$$BW = 100fc \quad (3.30)$$

- * Slew Rate (SR): Deve ser maior ou igual ao produto de 2π , a tensão de saída e a frequência de corte, conforme a equação 3.31;

$$Slew \text{ Rate} \geq 2\pi V_{o(p-p)} \quad (3.31)$$

2. Especificações secundárias:

- * *Input Common Mode Voltage* (V_{CMR}) : Esta variável define o limite do alcance do sinal de entrada;
- * *Input Current Bias* (I_B): Esta variável indica a quantidade de corrente entrando ou saindo dos pinos de entrada do amplificador operacional.

Para as condições do projeto, as especificações mínimas são:

$$BW = 100 \cdot 5000 = 0,5 \text{ MHz} \quad (3.32)$$

$$Slew \text{ Rate} \geq 2\pi \cdot 2 \cdot 2,5 \sqrt{2} 5000 = 222,144 \cdot 10^3 \frac{V}{s} \quad (3.33)$$

$$Slew \text{ Rate} \geq \frac{222,144 \cdot 10^3 \text{ V}}{1 \cdot 10^6 \mu s} \quad (3.34)$$

$$Slew\ Rate \geq 0,222 \frac{V}{\mu s} \quad (3.35)$$

Visando atender as especificações mínimas acima, foi selecionado o amplificador operacional TL071, as características desse amplificador operacional estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações técnicas do amplificador operacional TL071.

Característica	Valor
Largura de Banda	3 MHz
<i>Slew Rate</i>	13 V/ μ s
V_{CMR}	−12 a 15 V
I_B	65 a 200 nA
CMRR	100 dB

Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2017).

3.7 O Sistema de Alimentação

O sistema de alimentação é constituído de uma fonte de alimentação com entrada em 220 V em corrente alternada e uma saída simétrica com ± 15 V em corrente contínua, que deve ser capaz de alimentar os sensores de tensão e corrente e os amplificadores operacionais. A Tabela 6 mostra o consumo de corrente dos componentes da placa de aquisição de dados fornecendo a corrente mínima de projeto para o sistema de alimentação.

Tabela 6 – Consumo de corrente dos componentes da placa de aquisição de dados.

Componentes	Quantidade	Corrente Unitária (mA)	Corrente Total (mA)
LV-25P	4	10 (entrada)+25 (saída)	140
LA-55P	4	10 (entrada)+50 (saída)	240
TL071	25	1,5 (nominal), 2,5 (máxima)	62,5
Total			442,5

Fonte: Própria.

O transformador abaixador deve possuir tensão de ± 15 V, com tap central e fornecer uma corrente mínima de até 0,442 A. O transformador reduz a tensão da rede e alimenta um retificador em ponte de diodos obtendo uma tensão contínua pulsante com o dobro da frequência inicial.

A tensão no regulador de tensão deve ser no mínimo 15 V. Com isso o *ripple* não pode ser maior que a tensão proveniente da ponte retificadora menos a tensão do regulador, ou seja $(15\sqrt{2} - 1,4) - 15 = 4,81$ V. Como a tensão do transformador é um pouco maior que a tensão de saída tem-se uma considerável faixa permitida para o *ripple*, com isso considerando uma margem de segurança e uma tensão mais estável para o regulador. De acordo com Buso (2016, p.29), através da equação 3.36 pode-se calcular o capacitor necessário para se obter o ripple desejado. Para este projeto, define-se que a tensão de *ripple* V_r seja de 5% da tensão máxima da fonte.

$$C = \frac{Idc}{4\sqrt{3}fV_r} \quad (3.36)$$

$$C = \frac{1}{4\sqrt{3} \cdot 120 \cdot 0,75} \quad (3.37)$$

$$C = 1,60375 \cdot 10^{-3} \quad (3.38)$$

$$C = 1603,75 \mu F \quad (3.39)$$

A capacitância mínima calculada para se obter um ripple V_r foi de 1603 μF , no entanto, opta-se por um valor superior encontrado comercialmente, sendo de 2200 μF . Os capacitores cerâmicos de 0.1 μF foram utilizados para uma melhor resposta transiente e estabilidade no regulador de tensão. Os reguladores de tensão são os LM 7815 para tensões positivas e o LM 7915 para tensões negativas ajustando a tensão de saída para ± 15 V. Por fim, a Figura 24 encontra-se o esquemático do sistema de alimentação.

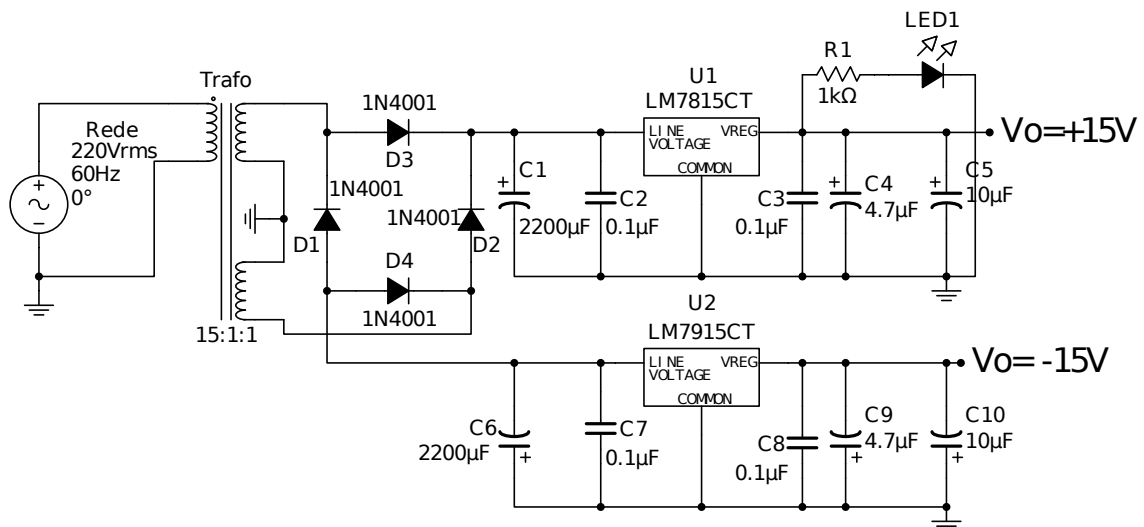


Figura 24 – Esquemático do sistema de alimentação. Fonte: Própria.

3.8 Simulações

A Figura 25 mostra o circuito completo do filtro e condicionador de sinais, sendo que, o diodo zener na saída com $V_z = 3,3\text{ V}$ tem a função de proteção. Este trabalho utilizará oito circuitos idênticos a este, sendo quatro destinados a sensores de tensão e outros quatro destinados a sensores de corrente.

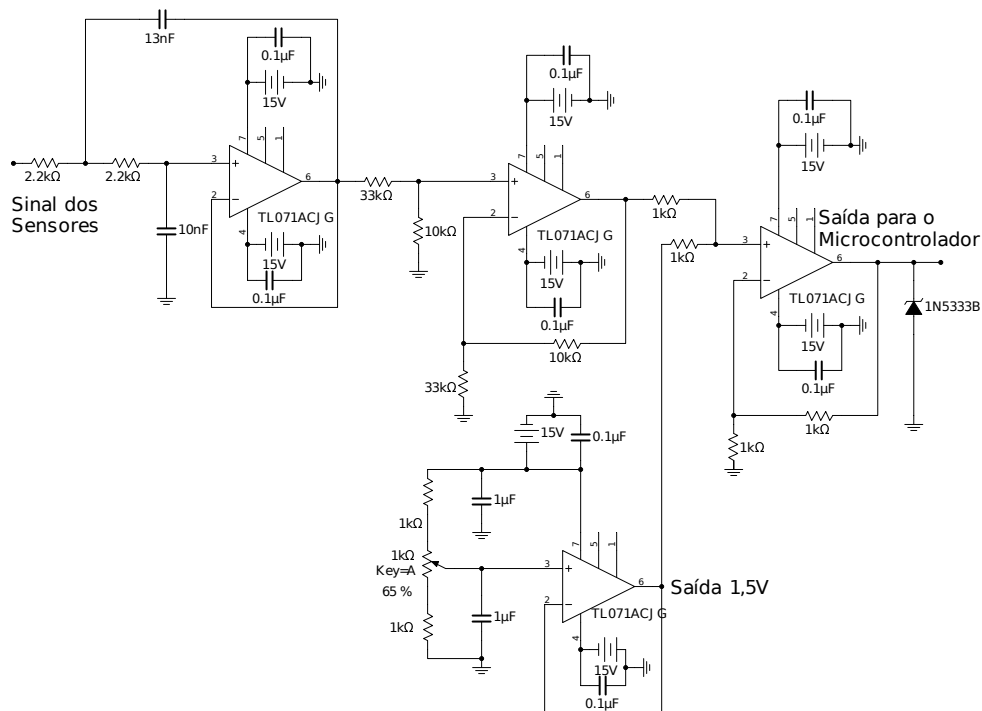


Figura 25 – Circuito completo do do filtro e condicionador de sinais. Fonte: Própria.

A Figura 26 mostra a simulação dos sinais de entrada e saída do circuito do filtro com um ruído de $0,1\text{ V}$, evidenciando que ele realmente atenua os sinais com frequência acima da frequência de corte $f_c = 5\text{ kHz}$.

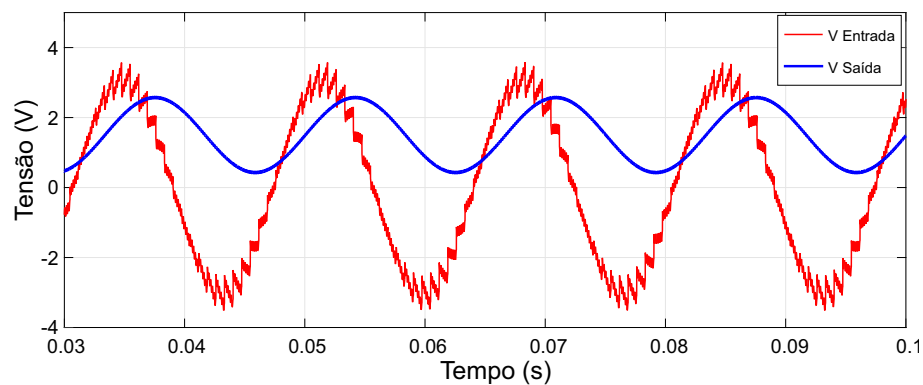


Figura 26 – Gráfico com os sinais de entrada e saída com ruído de 7 kHz simulado. Fonte: Própria.

3.9 Placa de Circuito Impresso

A Placa de Circuito Impresso (PCI) consiste em criar uma rota de ligação (trilha) entre os componentes por meio de uma camada de cobre sobre uma placa de fenolite ou fibra de vidro, dessa forma é possível otimizar o espaço entre os componentes e minimizar o caminho por onde percorre a corrente. A construção de uma PCI envolve uma série de análises e considerações onde apenas algumas delas serão abordadas neste trabalho. A seguir serão descritas os fatores considerados para confecção das placas de circuitos confeccionadas.

3.9.1 A Largura da Trilha

A largura da trilha em conjunto com a espessura da camada de cobre são fatores que irão definir a capacidade de condução de corrente. Esse fator é de extrema importância, pois, para que o circuito funcione como desejado é necessário que cada componente receba a potência necessária para seu correto funcionamento, além disso, uma trilha mal dimensionada acarreta em seu aquecimento podendo levar a ruptura.

A Tabela 7 a seguir mostra a forma de determinar a largura da trilha em função da corrente e espessura da camada de cobre. O sistema foi projetado para atender uma corrente de 1 A. De acordo com a Tabela 7, para uma espessura de cobre de 1 oz¹ e uma corrente de 1,4 A temos que a largura mínima da trilha deve ser de 20 mils, que equivale aproximadamente 0,5 mm.

Tabela 7 – Largura mínima da trilha de acordo com a corrente que deverá suportar.

Largura da trilha (cobre)	Corrente [A]	Corrente [A]
	1 oz	2 oz
5 mils	0,5	0,7
10 mils	0,8	1,4
20 mils	1,4	2,2
30 mils	1,9	3,0
50 mils	2,5	4,0
100 mils	4,0	7,0

Fonte: Adaptado de [Lima e Villaça \(2012\)](#).

Uma trilha mais larga implica em maior condução de corrente, confiabilidade do circuito e menor dificuldade na produção, por esses motivos foi utilizado uma trilha de 1,5 mm.

¹ oz = 1 onça/pé² = 30 mg/cm²

3.9.2 O Espaçamento Entre as Trilhas

O espaçamento entre as trilhas adjacentes é um fator que visa minimizar os efeitos não desejados entre as mesmas. Tais efeitos incluem interferências eletromagnéticas devido ao campo eletromagnético da corrente, aumento da capacitância do circuito (dois condutores separados por um dielétrico) e condução de elétrons através do ar. A Tabela 8 apresenta as distâncias mínimas entre trilhas, em função da tensão do sistema.

Tabela 8 – Distância mínima entre trilhas de acordo com a diferença de potencial que estarão sujeitas.

Tensão (DC ou AC de pico)	Distância entre trilhas	
0-30 V	0,1 mm	8 mils
31-50 V	0,6 mm	25 mils
51-100 V	1,5 mm	60 mils
101-170 V	3,2 mm	150 mils
171-250 V	6,4 mm	300 mils
251-500 V	12,5 mm	500 mils

Fonte: Adaptado de [Lima e Villaça \(2012\)](#).

A tensão máxima presente na placa de aquisição e condicionamento de sinais é a tensão da fonte de alimentação de $\pm 15\text{ V}$, o que resulta em uma diferença máxima de 30 V , sendo assim considerando essa tensão, de acordo com a Tabela 8 o espaçamento entre as trilhas não deve ser menor que $0,1\text{ mm}$.

3.9.3 A Confecção das PCI's

A confecção das trilhas tiveram como resultado a utilização apenas de uma *layer* tendo o negativo em uma malha comum (plano de terra), isso permite um melhor aproveitamento da área de cobre e diminui interferências eletromagnéticas. A Figura 27 apresenta o *layout* da placa de condicionamento de sinais.

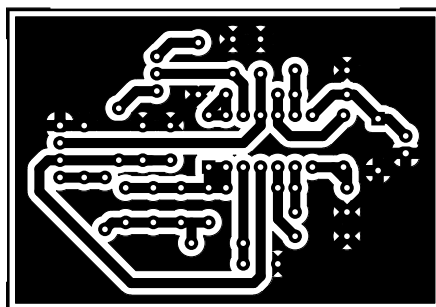


Figura 27 – *Layout* da placa de condicionamento de sinais. Fonte: Própria.

A Figura 28 apresenta o *layout* final da placa mãe, destinada a acomodação dos circuitos de condicionamento e fonte de alimentação.

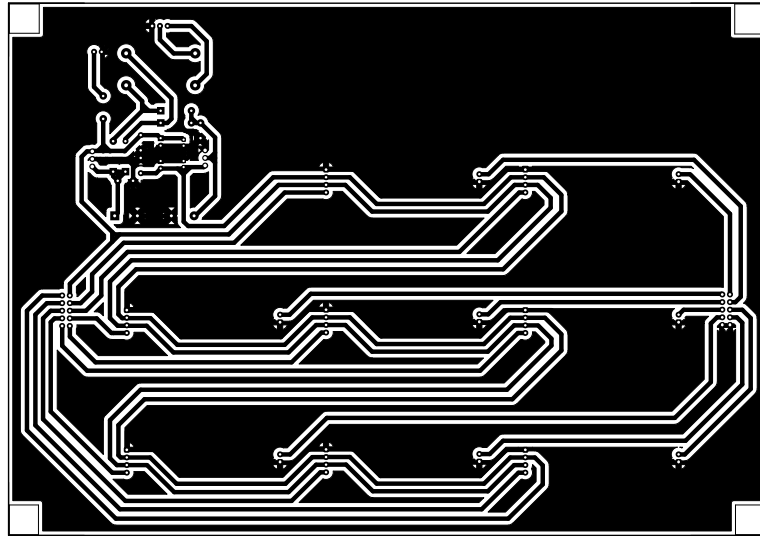


Figura 28 – *Layout* da placa mãe. Fonte: Própria.

A Figura 29 apresenta o *layout* da placa dos sensores destinada a acomodação dos sensores de tensão e corrente.

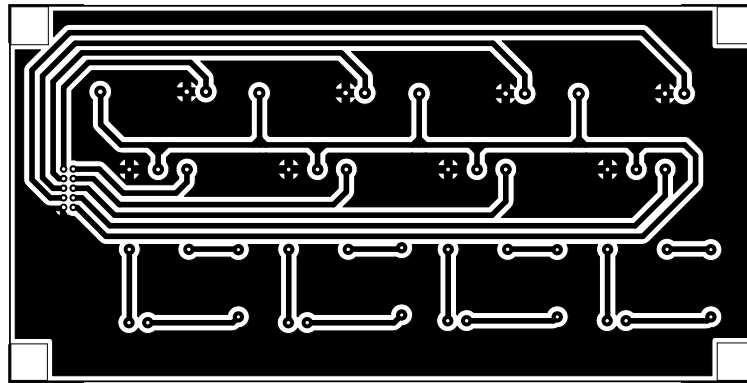


Figura 29 – *Layout* da placa dos sensores. Fonte: Própria.

As placas foram confeccionadas utilizando o método de transferência fotossensível em placas de fenolite e fibra de vidro. Esse método permite uma precisão maior das trilhas e evita a separação entre o cobre e o fenolite devido o aquecimento quando comparado com o método de transferência térmica. Neste projeto foram feitas as camadas da trilha, serigrafia e máscara de solda.

A Figura 43 mostra o resultado da confecção das placas de circuito impresso.

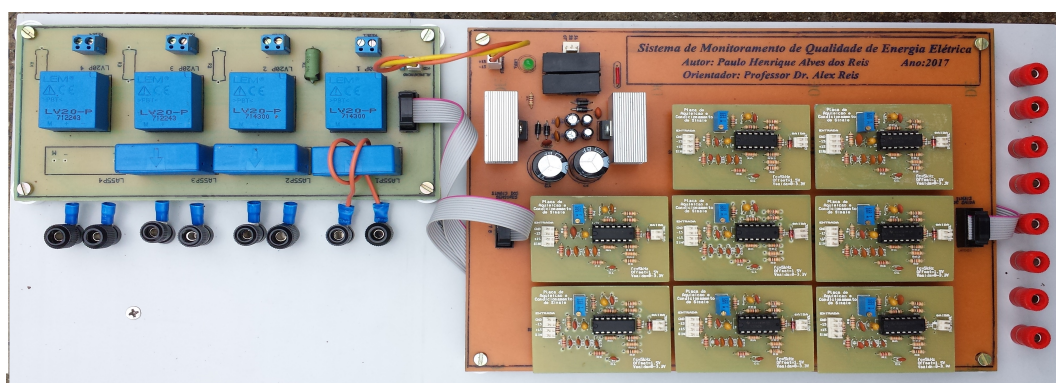


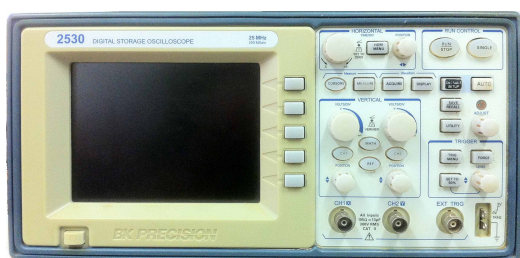
Figura 30 – Sistema de aquisição e condicionamento de sinais. Fonte: Própria.

3.10 Testes de Desempenho do Sistema

Esta seção detalha a avaliação experimental do sistema de aquisição e condicionamento de sinais de tensão e corrente.

3.10.1 Avaliação Experimental da Placa de Condicionamento

Os testes das placas de Aquisição e Condicionamento de Sinais foram realizados utilizando um gerador de funções da SIGLENT modelo SDG 1020 e um osciloscópio da BK Precision modelo 2530, conforme apresentado na Figura 31.



(a) Osciloscópio.



(b) Gerador de Sinais.

Figura 31 – Ferramentas de teste de desempenho laboratorial. Fonte: Própria.

Inicialmente, foi realizada a calibração da PCI, por meio do ajuste do potenciômetro existente no circuito de regulação de tensão, até que um sinal de $1,5\text{ V}$ fosse obtido na saída do sistema de condicionamento. Tais valores foram verificados através do osciloscópio.

O teste a seguir mostrado na Figura 32 foi realizado utilizando a função *Gaussian white noise*, a qual segundo o fabricante SIGLENT (2016), gera um ruído com uma

frequência superior a 20 MHz . O canal um (CH1), na parte inferior, corresponde ao sinal de entrada e o canal dois (CH2), na parte superior, corresponde ao sinal de saída. Tal figura evidencia o comportamento do sistema de aquisição, no que tange à atenuação de sinais de elevadas frequências.

Para altas frequências a atenuação em um filtro passa baixas deve ser alta, sendo assim de acordo com a Figura 32, percebe-se que o sistema atenuou de acordo com o previsto na função de transferência do sistema as frequências acima da frequência de corte. Ao aumentar a amplitude do ruído a percepção da atenuação do sinal se torna mais evidente.

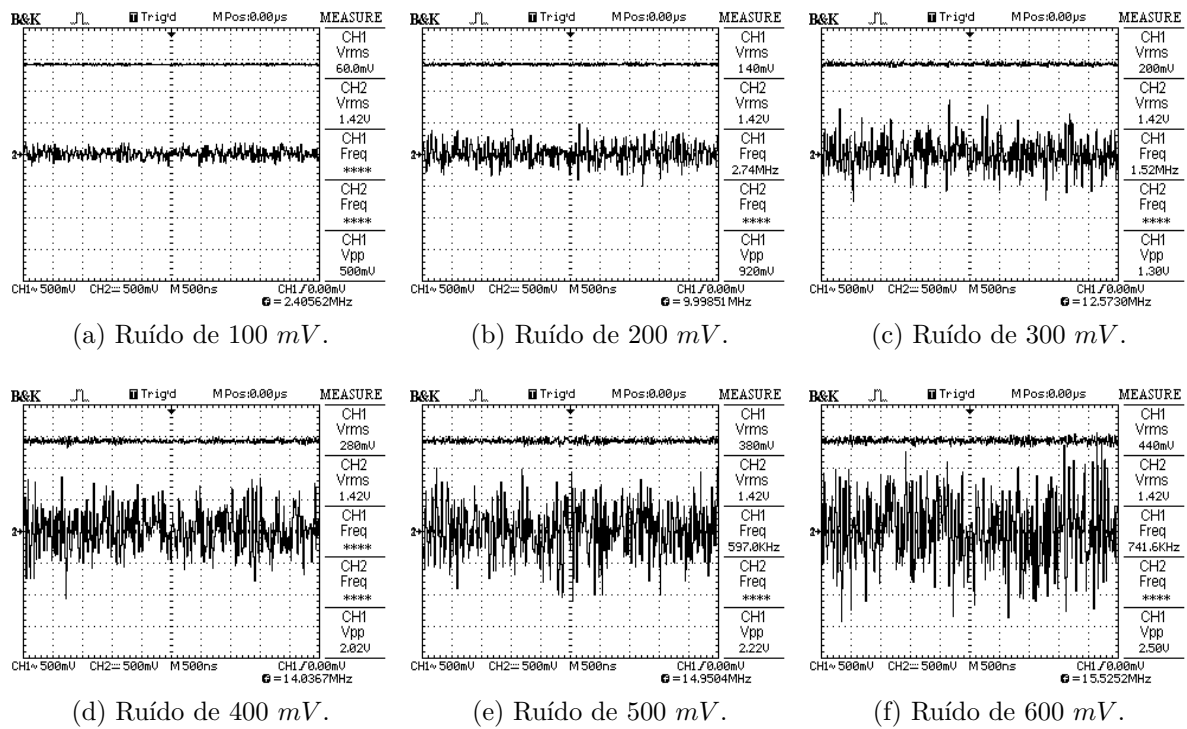


Figura 32 – Formas de onda de entrada e saída aplicando a função de ruído para diferentes tensões. Fonte: Própria.

Na sequência, ajustou-se o gerador de funções as frequências de 50 Hz , 60 Hz , 120 Hz , 300 Hz , 1 kHz , 10 kHz , 100 kHz , 1 MHz e 10 MHz , assim como as tensões de 1 V_{pp} , 3 V_{pp} e 5 V_{pp} . Estes sinais foram aplicados na entrada do circuito de condicionamento, possibilitando a análise do sistema construído. As Figuras 33, 34, 35 e 36 apresentam a correlação entre o sinal de entrada e o sinal de saída da placa. As Figuras 33 e 34 apresentam a saída com acoplamento DC, ao passo que as Figuras 35 e 36 em acoplamento AC. O canal um (CH1), na parte inferior, corresponde ao sinal de entrada e o canal dois (CH2), na parte superior, corresponde ao sinal de saída.

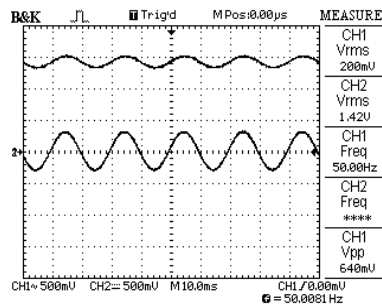
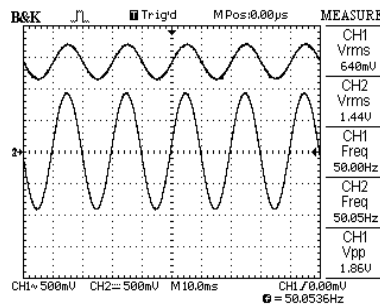
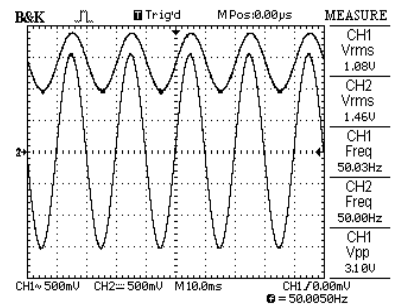
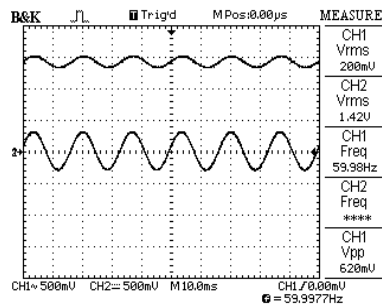
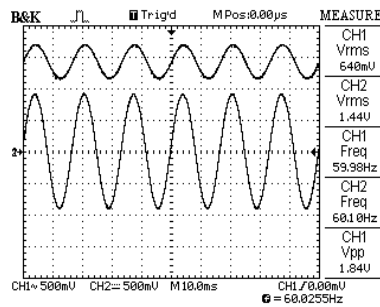
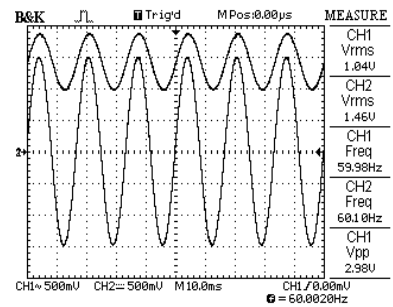
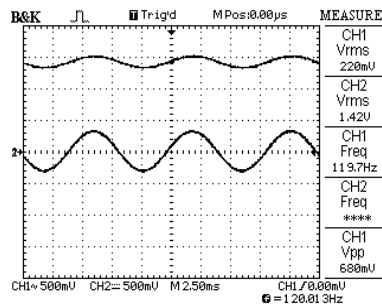
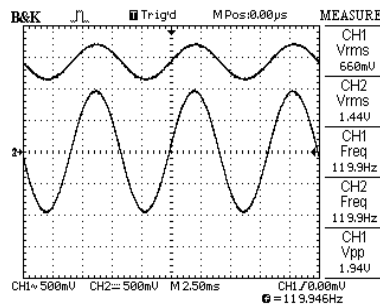
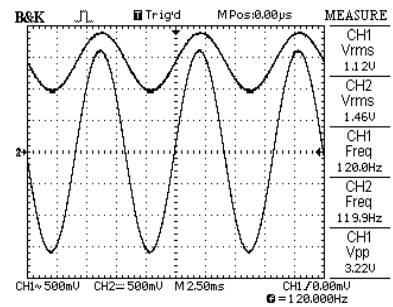
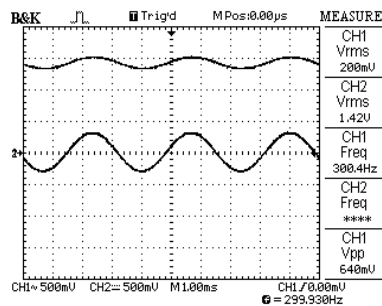
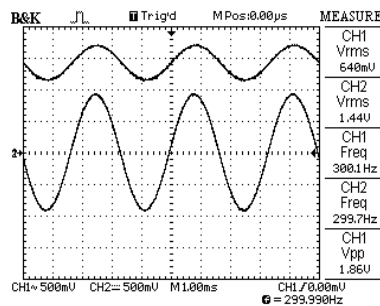
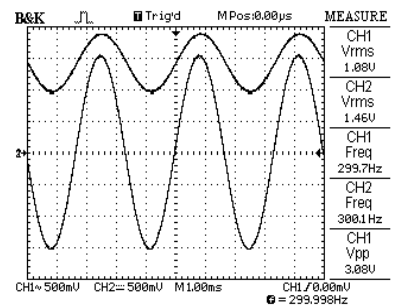
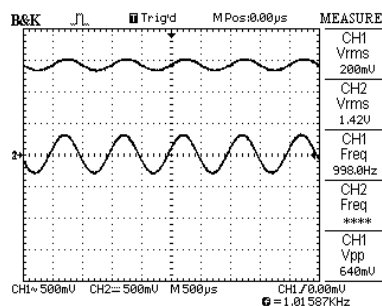
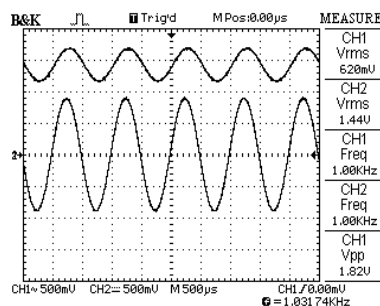
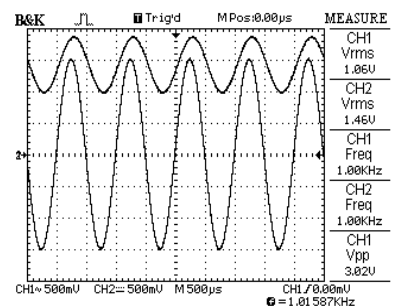
(a) Frequência 50 Hz e 1 V_{pp} .(b) Frequência 50 Hz e 3 V_{pp} .(c) Frequência 50 Hz e 5 V_{pp} .(d) Frequência 60 Hz e 1 V_{pp} .(e) Frequência 60 Hz e 3 V_{pp} .(f) Frequência 60 Hz e 5 V_{pp} .(g) Frequência 120 Hz e 1 V_{pp} .(h) Frequência 120 Hz e 3 V_{pp} .(i) Frequência 120 Hz e 5 V_{pp} .(j) Frequência 300 Hz e 1 V_{pp} .(k) Frequência 300 Hz e 3 V_{pp} .(l) Frequência 300 Hz e 5 V_{pp} .(m) Frequência 1 kHz e 1 V_{pp} .(n) Frequência 1 kHz e 3 V_{pp} .(o) Frequência 1 kHz e 5 V_{pp} .

Figura 33 – Formas de Onda de entrada e saída para diferentes frequências e tensões de entrada com canal dois com acoplamento DC. Fonte: Própria.

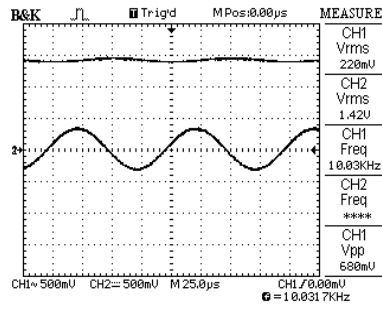
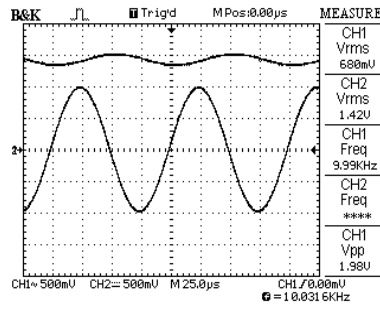
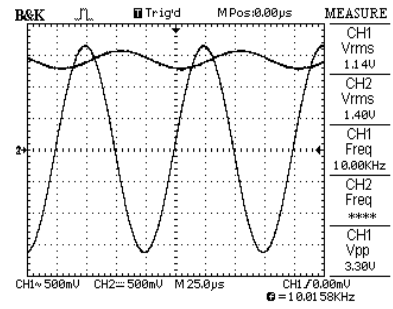
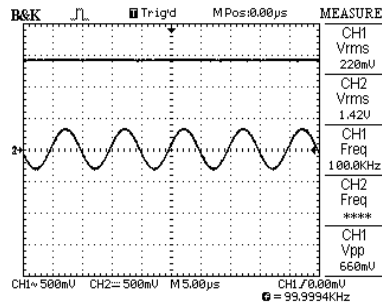
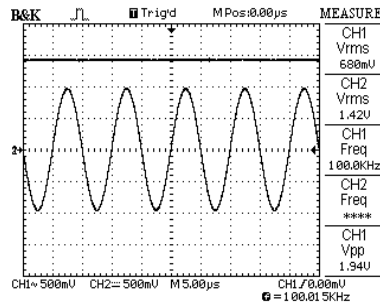
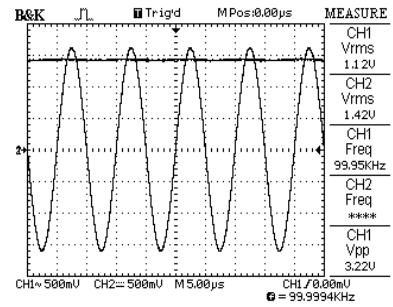
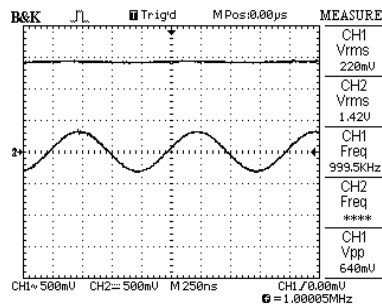
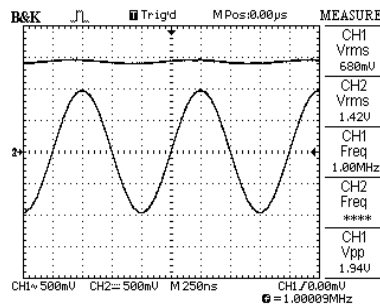
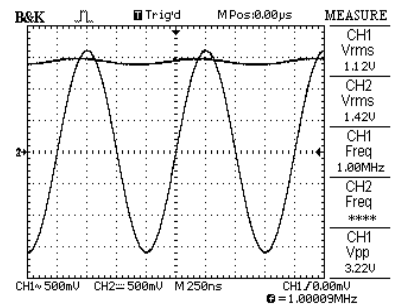
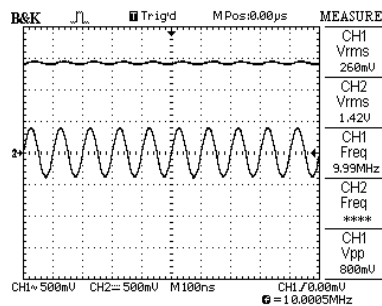
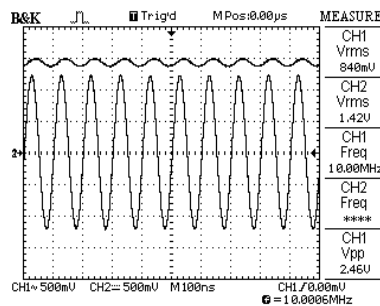
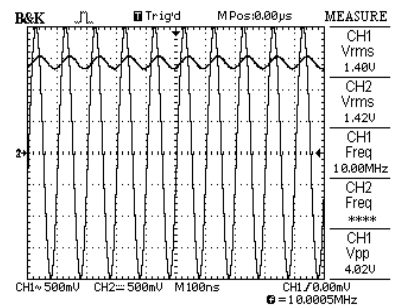
(a) Frequência 10 kHz e 1 V_{pp}.(b) Frequência 10 kHz e 3 V_{pp}.(c) Frequência 10 kHz e 5 V_{pp}.(d) Frequência 100 kHz e 1 V_{pp}.(e) Frequência 100 kHz e 3 V_{pp}.(f) Frequência 100 kHz e 5 V_{pp}.(g) Frequência 1 MHz e 1 V_{pp}.(h) Frequência 1 MHz e 3 V_{pp}.(i) Frequência 1 MHz e 5 V_{pp}.(j) Frequência 10 MHz e 1 V_{pp}.(k) Frequência 10 MHz e 3 V_{pp}.(l) Frequência 10 MHz e 5 V_{pp}.

Figura 34 – Formas de Onda de entrada e saída para diferentes frequências e tensões de entrada com canal dois com acoplamento DC. Fonte: Própria.

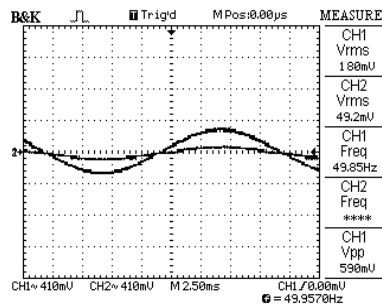
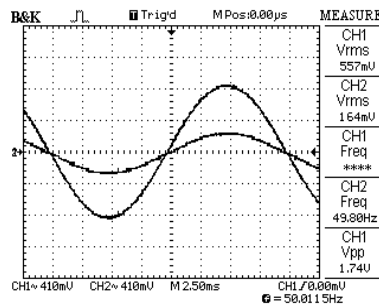
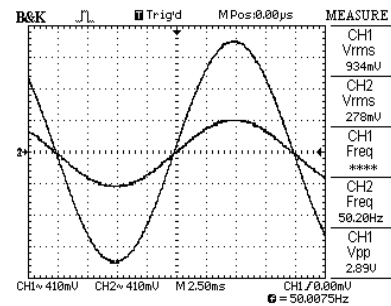
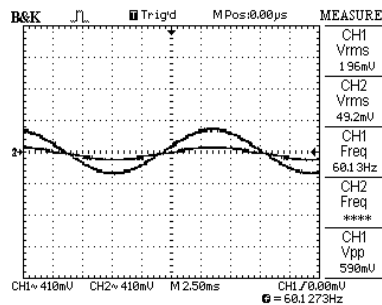
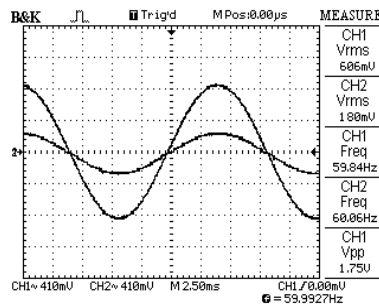
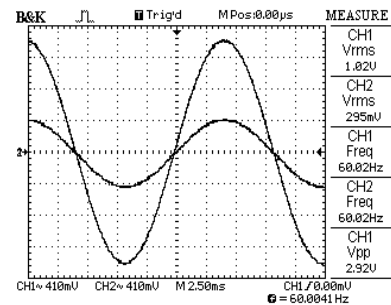
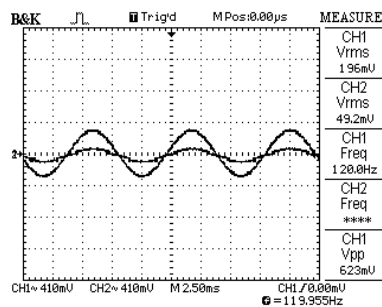
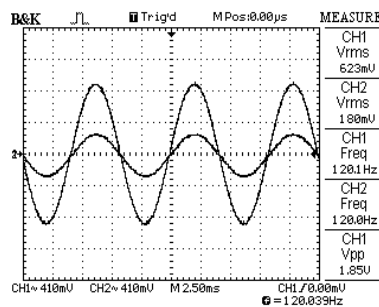
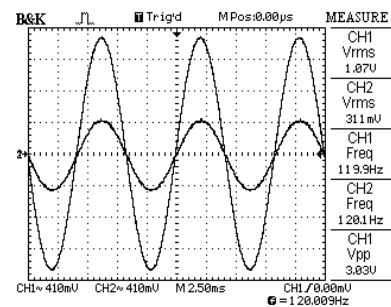
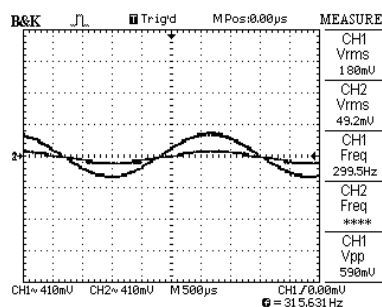
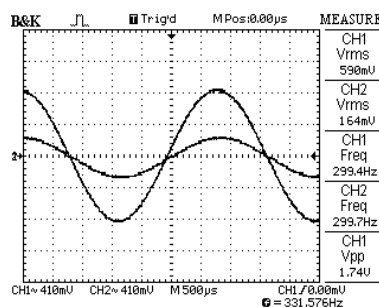
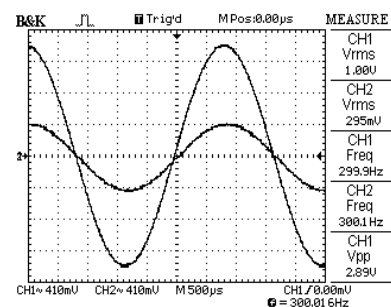
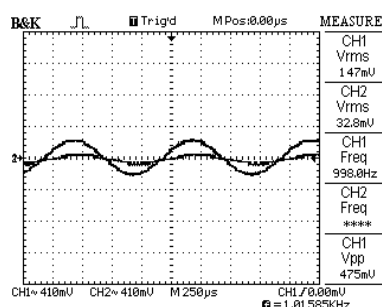
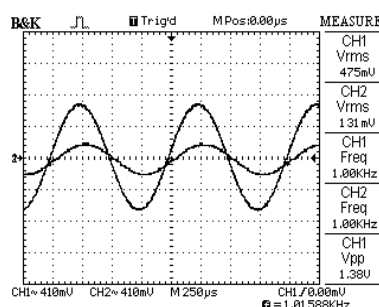
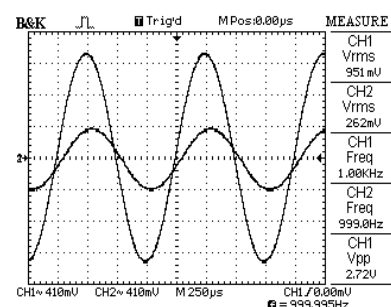
(a) Frequência 50 Hz e 1 V_{pp} .(b) Frequência 50 Hz e 3 V_{pp} .(c) Frequência 50 Hz e 5 V_{pp} .(d) Frequência 60 Hz e 1 V_{pp} .(e) Frequência 60 Hz e 3 V_{pp} .(f) Frequência 60 Hz e 5 V_{pp} .(g) Frequência 120 Hz e 1 V_{pp} .(h) Frequência 120 Hz e 3 V_{pp} .(i) Frequência 120 Hz e 5 V_{pp} .(j) Frequência 300 Hz e 1 V_{pp} .(k) Frequência 300 Hz e 3 V_{pp} .(l) Frequência 300 Hz e 5 V_{pp} .(m) Frequência 1 kHz e 1 V_{pp} .(n) Frequência 1 kHz e 3 V_{pp} .(o) Frequência 1 kHz e 5 V_{pp} .

Figura 35 – Formas de onda de entrada e saída para diferentes frequências e tensões de entrada com canal dois com acoplamento AC. Fonte: Própria.

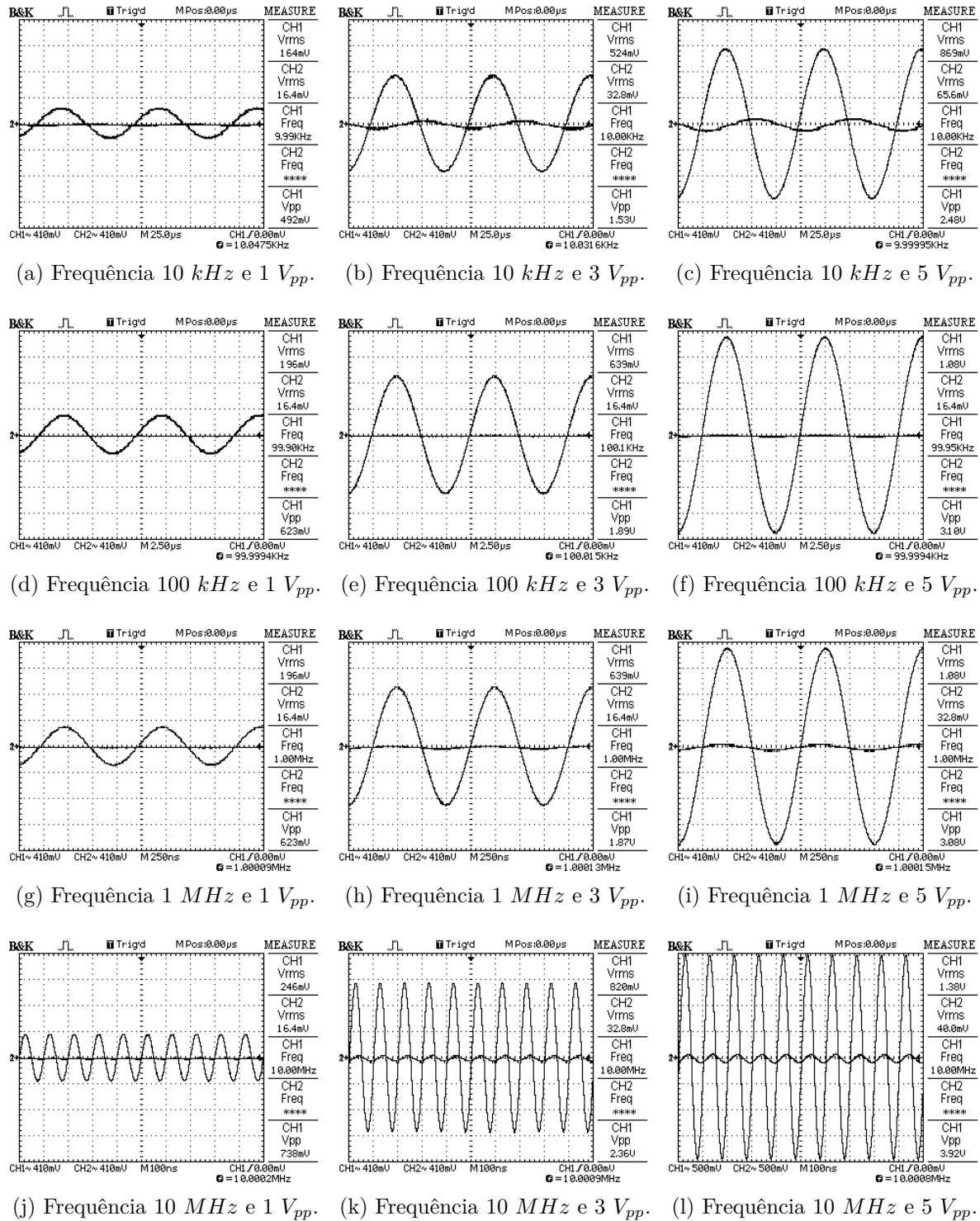


Figura 36 – Formas de onda de entrada e saída para diferentes frequências e tensões de entrada com canal dois com acoplamento AC. Fonte: Própria.

De acordo com as Figuras 33 e 34 foi possível verificar o funcionamento do sistema de forma que o sinal de saída possui as características de projeto: o sinal foi filtrado,

atenuado e sobreposto a um nível DC de, aproximadamente, $1,5\text{ V}$. Comparando os sinais de entrada e saída verificou-se a atenuação de aproximadamente 70% e por fim o circuito atenuou sinais com frequências acima de 5 kHz , sendo visível de forma notável para as frequências de 100 kHz , 1 MHz e 10 MHz .

A Figura 37 mostra a função transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*-FFT) aplicada na entrada e saída de um sinal. Tal Figura evidencia que os sinais que possuem frequências superiores à frequência de corte do filtro são atenuadas. Esta condição é importante para a implementação de sistemas de medição, garantindo o atendimento do Critério de Nyquist.

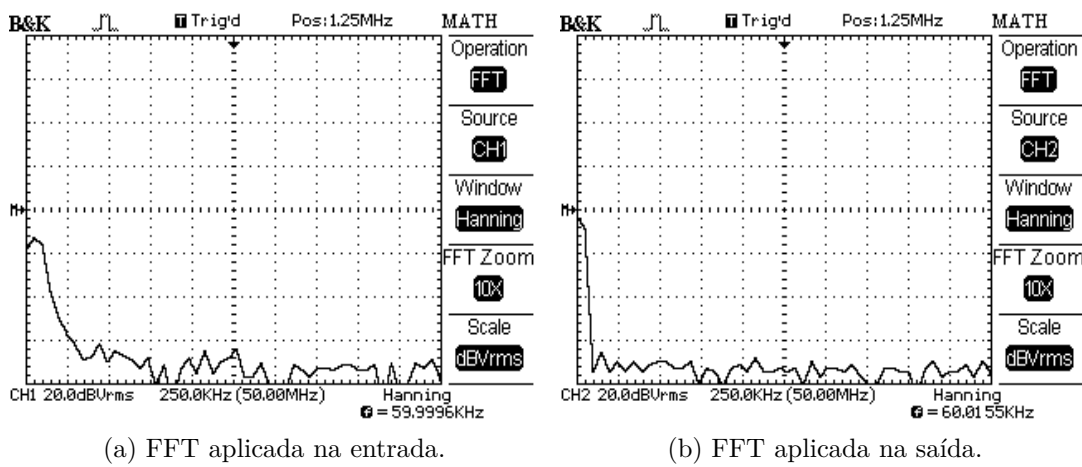


Figura 37 – Transformadas de Fourier na entrada e saída para uma tensão de 3 V_{pp} e 60 Hz . Fonte: Própria.

A Figura 38 mostra os gráficos de Bode para as tensões de 1 V_{pp} , 3 V_{pp} e 5 V_{pp} obtidos experimentalmente. Os pontos das curvas foram retirados das Figuras 35 e 36. Comparando as Figuras 15a e 38 é possível perceber a semelhança entre as curvas e que o sistema atendeu ao projetado. Contudo as diferenças se deram devido aos valores medidos em altas frequências na saída serem menores que o erro de escala. Com uma escala de $500\text{ mV}/\text{Div}$, como pode ser visto na Figura 36l o erro mínimo, sabendo que o instrumento é digital é de $\pm 100\text{ mV}$. Entretanto o valor medido foi de 40 mV , que é menor que o erro da escala, sendo este fato responsável pelas discrepâncias observadas.

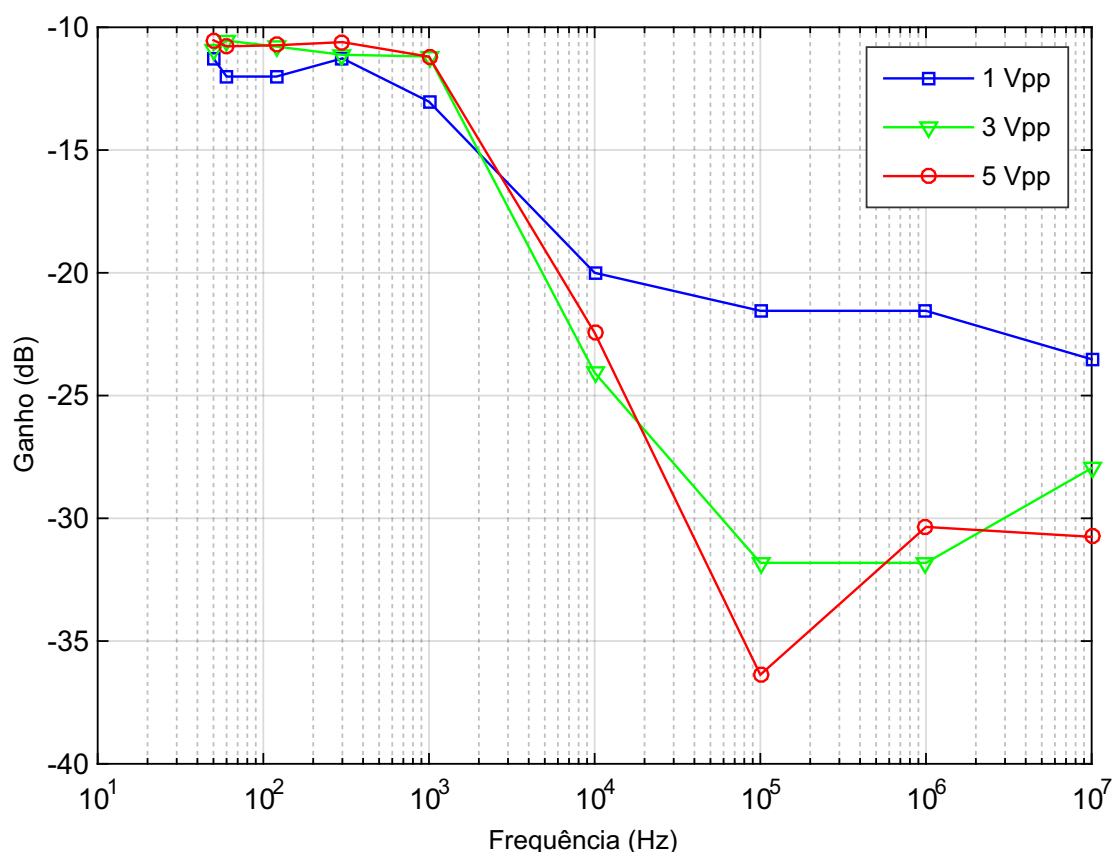


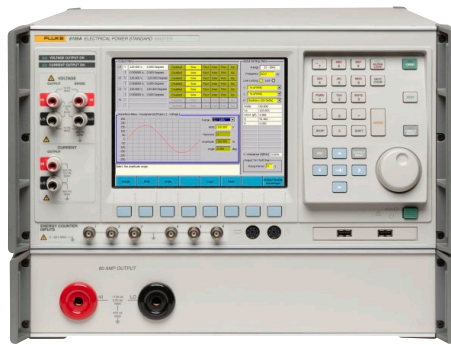
Figura 38 – Gráfico de Bode obtido experimentalmente. Fonte: Própria.

Deve-se observar também o efeito de defasagem em que a tensão de saída fica atrasada em relação à tensão de entrada, o qual está associado ao comportamento do próprio filtro. Todavia, em função da limitação dos equipamentos laboratoriais, não foi possível quantificar esta grandeza. Visto que o sistema foi projetado para trabalhar em baixas frequências, tem-se que a defasagem não interfere na análise da QEE.

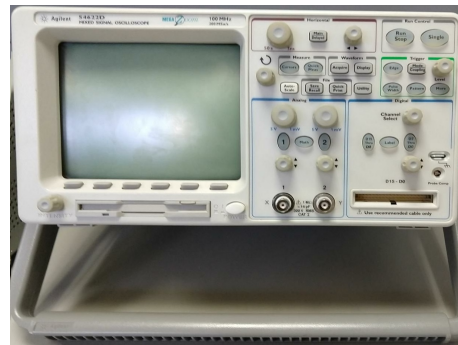
3.10.2 Avaliação Experimental do Sistema Completo

Os testes do sistema completo, considerando os sensores de tensão e corrente e as placas de condicionamento, foram realizados utilizando uma fonte de tensão controlada da Fluke *Electrical Power Standard Master*, modelo 6105A e um osciloscópio Agilent modelo 54622D, conforme apresentado na Figura 39.

Nesta etapa dos trabalhos, os sistemas de medição de tensão e corrente foram testados de forma independente, uma vez que a fonte permitia esta configuração.



(a) Fonte controlada. Fonte: (FLUKE, 2011).



(b) Osciloscópio. Fonte: Própria.

Figura 39 – Ferramentas de teste de desempenho para avaliação experimental do sistema completo.

Por meio do osciloscópio obteve-se as formas de onda na entrada e saída para o sensor de tensão e formas de onda de saída para o sensor de corrente. As formas de onda com as medições podem ser vistas nas Figuras 40, 41 e 42. Os testes foram divididos em duas etapas:

1. A Figura 40 apresenta os resultados experimentais para a medição de corrente. Os seguinte casos foram avaliados:

- ▷ Caso 01: onda de corrente de frequência fundamental, com 5 A de amplitude;
- ▷ Caso 02: onda de corrente de frequência fundamental com 5 A de amplitude sobreposta a uma 5^a harmônica de 1 A de amplitude;
- ▷ Caso 03: onda de corrente de frequência fundamental com 5 A de amplitude sobreposta a uma 7^a harmônica de 1 A de amplitude;
- ▷ Caso 04: onda de corrente de frequência fundamental com 5 A de amplitude sobreposta a uma 5^a harmônica de 1 A de amplitude e 7^a harmônica de 0,5 A de amplitude.

De acordo com a Figura 40 é possível notar o correto funcionamento do sensor de tensão ao disponibilizar um sinal com amplitude reduzida e as mesmas características, quando comparado ao sinal aplicado em sua entrada.

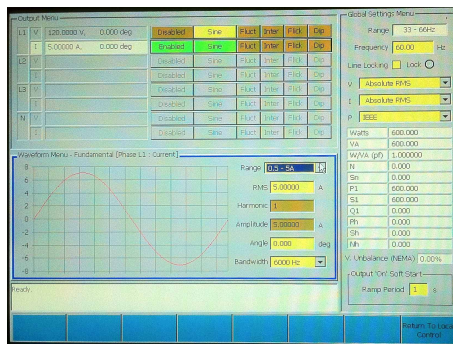
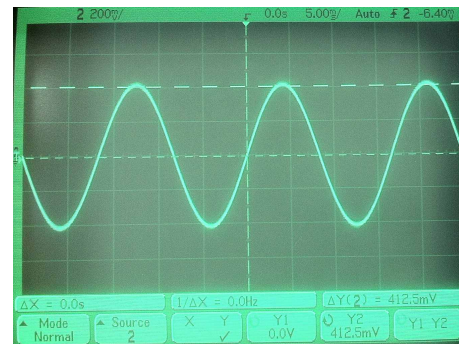
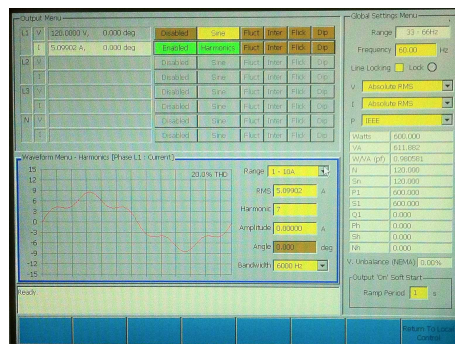
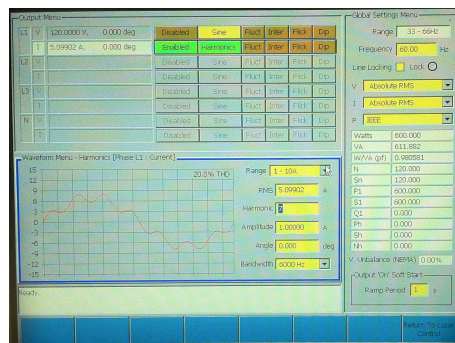
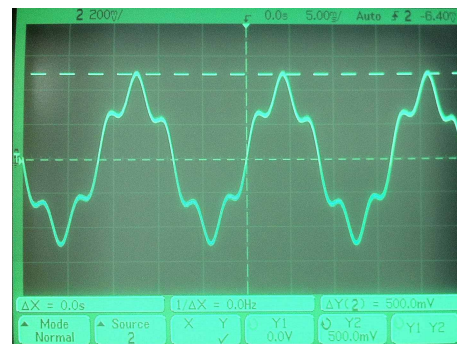
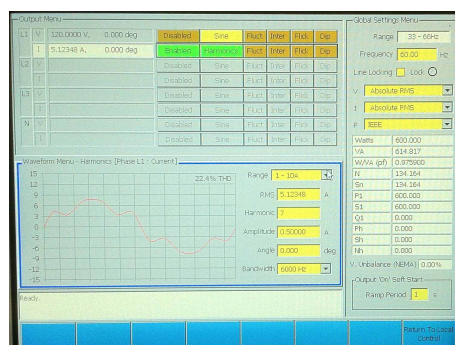
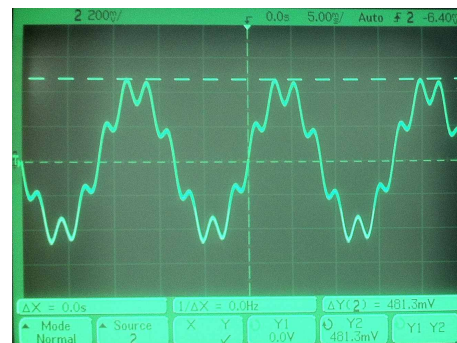
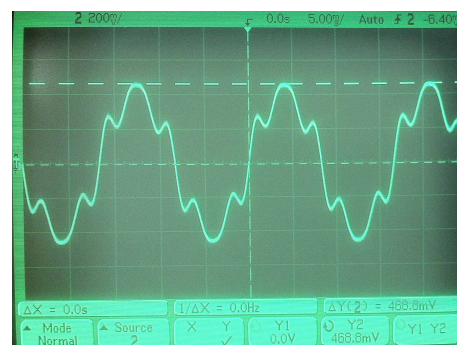
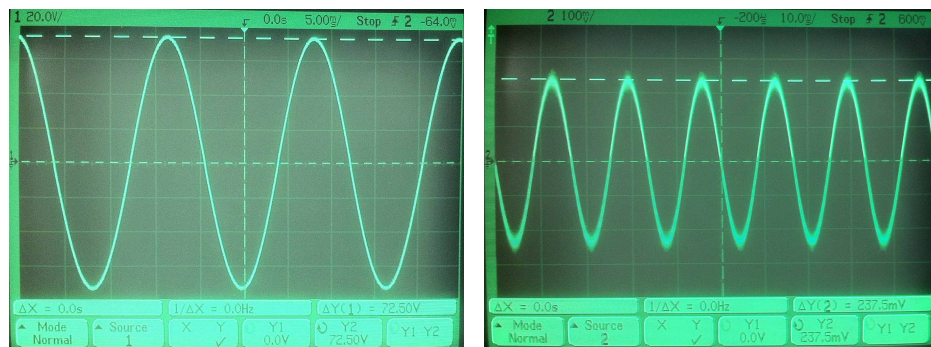
(a) Onda fundamental com $I_{in} = 5$ A.(b) V_{out} para $I_{in} = 5$ A.(c) Onda Fundamental com $I_{in} = 5$ A e (d) V_{out} para $I_{in} = 5$ A com harmônico de 5ª ordem.(e) Onda Fundamental com $I_{in} = 5$ A e (f) V_{out} para $I_{in} = 5$ A com harmônico de 7ª ordem.(g) Onda Fundamental com $I_{in} = 5$ A e (h) V_{out} para $I_{in} = 5$ A com harmônicos de 5ª e 7ª ordem.

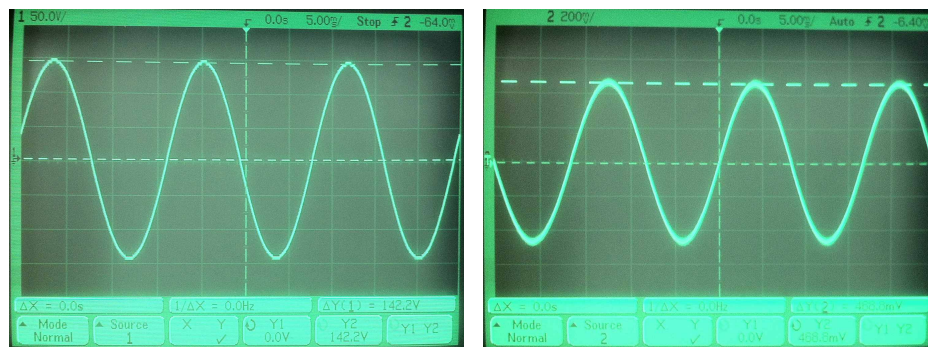
Figura 40 – Formas de onda de saída para teste com o sensor de corrente. Fonte: Própria.

2. As Figuras 41 e 42 apresentam os resultados experimentais para a medição de tensão. Os seguintes casos foram avaliados:

- ▷ Caso 01: onda de tensão de frequência fundamental de valor eficaz de 50 V;
- ▷ Caso 02: onda de tensão de frequência fundamental de valor eficaz de 100 V;
- ▷ Caso 03: onda de tensão de frequência fundamental, com valor eficaz de 100 V, sobreposta a uma 5ª harmônica com valor eficaz de 10 V;
- ▷ Caso 04: onda de tensão de frequência fundamental, com valor eficaz de 100 V, sobreposta a uma 7ª harmônica com valor eficaz de 5 V;
- ▷ Caso 05: onda de tensão de frequência fundamental, com valor eficaz de 100 V, sobreposta às componentes de ordem 5ª e 7ª, com valores eficazes de 10 V e 5 V, respectivamente.

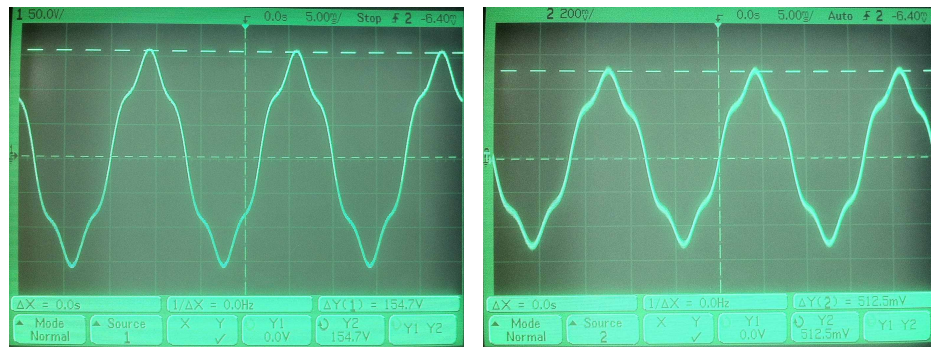


(a) Onda fundamental com $V_{in} = 50 V_{rms}$. (b) V_{out} para onda fundamental com $V_{in} = 50 V_{rms}$.

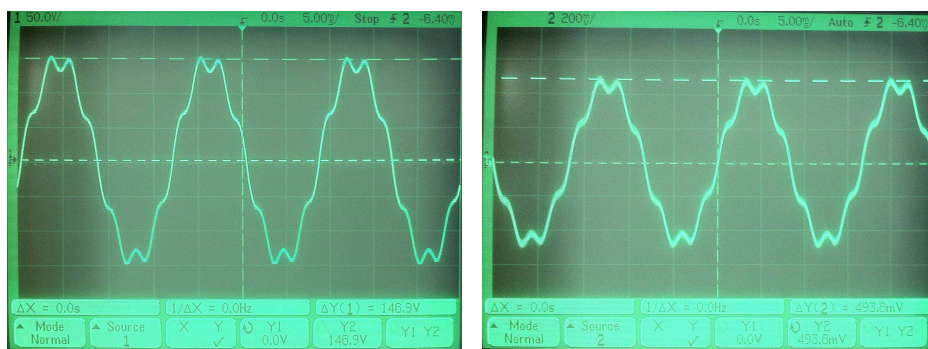


(c) Onda fundamental com $V_{in} = 100 V_{rms}$. (d) V_{out} para onda fundamental com $V_{in} = 100 V_{rms}$.

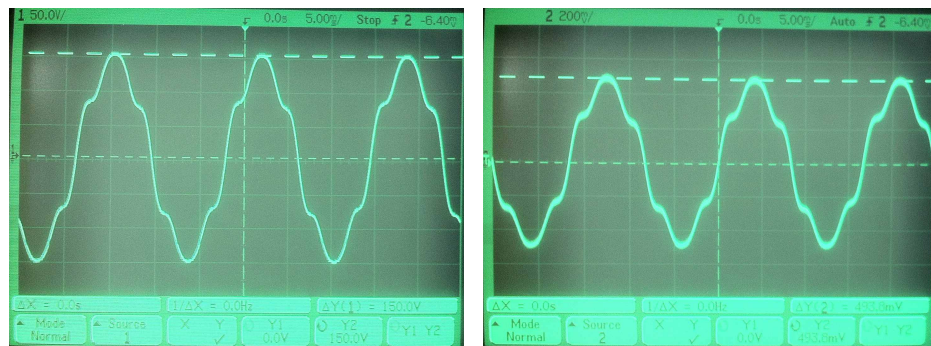
Figura 41 – Formas de onda de entrada e saída para teste com o sensor de tensão. Fonte: Própria.



(a) $V_{in} = 100 V_{rms}$ com harmônico de 5^a ordem. (b) V_{out} para $V_{in} = 100 V_{rms}$ com harmônico de 5^a ordem.



(c) $V_{in} = 100 V_{rms}$ com harmônico de 7^a ordem. (d) V_{out} para $V_{in} = 100 V_{rms}$ com harmônico de 7^a ordem.



(e) $V_{in} = 100 V_{rms}$ com harmônicos de 5^a e 7^a ordens. (f) V_{out} para $V_{in} = 100 V_{rms}$ com harmônicos de 5^a e 7^a ordens.

Figura 42 – Formas de onda de entrada e saída para teste com o sensor de tensão. Fonte: Própria.

As Tabelas 9 e 10 mostram as medições dos sinais de entrada e saída com os erros correspondentes, assim como os harmônicos introduzidos. Os valores foram obtidos com base nas Figuras 40 e 41.

Tabela 9 – Correntes de entrada e tensões de saída com os erros correspondentes para o sensor de corrente.

Caso	Corrente de Pico Na Entrada do Sensor (A)	V_{out}		Erro (%)
		Teórico (mV_p)	Experimental (mV_p)	
1	7,07	424,2	412	2,87
2	8,50	510	500	1,96
3	8,00	480	481,3	0,27
4	7,50	450	468,6	4,13

Fonte: Própria.

Tabela 10 – Tensões de entrada e saída com os erros correspondentes para o sensor de tensão.

Caso	Tensão de Pico Na Entrada do Sensor (V_p)	V_{out}		Erro (%)
		Teórico (mV_p)	Experimental (mV_p)	
1	72,50	247,15	237,5	3,90
2	142,2	484,77	468,8	3,29
3	154,7	527,38	512,5	2,82
4	146,9	500,79	493,8	1,39
5	150	511,36	493,8	3,43

Fonte: Própria.

4 Conclusão

Conforme ressaltado anteriormente, este Trabalho de Conclusão de Curso tem por objetivo a construção de um sistema de aquisição e condicionamento de sinais de tensão e corrente, o qual pode ser aplicado em dispositivos de medição de indicadores de qualidade de energia para baixas tensões. Todos os subsistemas foram projetados, implementados e testados em laboratório.

A implementação dos circuitos pelo método fotossensível se mostrou uma excelente opção para confecção de placas de circuito, utilizando esse método para confecção das camadas da trilha, serigrafia e máscara de solda o resultado é o mais próximo que se pode chegar do profissional. A modularidade dos subsistemas facilitou bastante a etapa do projeto e deixou o sistema muito mais sofisticado, dessa forma a placa mãe permite a entrada e saída dos sinais para análise e provém alimentação para os demais subsistemas, a placa de sensores os reúne em apenas um circuito impedindo interferências eletromagnéticas e a placa de aquisição e condicionamento de sinais permite uma fácil intercambiação podendo ser usada separadamente.

Por meio da construção deste sistema, tendo em vista a qualidade do produto, é possível obter um sinal de uma rede elétrica de baixa tensão com condições necessárias para a avaliação da QEE utilizando os indicadores previstos no Módulo 8 do PRODIST.

4.1 Trabalhos Futuros

- ◇ Criação de *Hardware* com *Display* e algoritmo em linguagem C para análise e visualização de distúrbios relacionados a QEE no próprio sistema.

Referências

- ANEEL, A. N. d. E. E. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional-PRODIST: Módulo 8-qualidade de energia elétrica*. [S.l.], 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em: 21 de Junho de 2018. Citado 3 vezes nas páginas 17, 23 e 24.
- BAKER, B. C.; MICROCHIP, T. *Select the Right Operational Amplifier for your Filtering Circuits-Analog Design Note ADN003*. [S.l.], 2003. Citado na página 40.
- BOYLESTAD, R. L. *Introdução à Análise de Circuitos*. 10. ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2004. Citado 5 vezes nas páginas 9, 26, 27, 28 e 29.
- BUSO, R. R. *Projeto e construção de uma fonte de alta tensão DC para aplicação em pulverização catódica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Setembro 2016. Citado na página 42.
- CARTER, B. *Op Amps for Everyone*. [S.l.]: Elsevier Science, 2012. ISBN 9780123944061. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 39.
- DORF, R. C.; SVOBODA, J. A. *Introduction to Electric Circuits*. 9. ed. United States of America: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 9781118560600. Citado na página 36.
- DUGAN, R. C. et al. *Electrical Power Systems Quality*. 2. ed. [S.l.]: McGraw Hill, 1995. Citado 7 vezes nas páginas 9, 17, 20, 21, 22, 23 e 24.
- FLUKE. *The Fluke 6105A and 6100B Electrical Power Standards*. [S.l.], 2011. Disponível em: <http://www.calpower.it/products/pdf/1779013_6203_ENG.pdf>. Acesso em: 21 de Junho de 2018. Citado na página 55.
- LEM. *Voltage Transducer LV 20-P*: Electrical data. [S.l.], 2014. 4 p. Citado 3 vezes nas páginas 9, 32 e 33.
- LEM. *Current Transducer LA 55-P*: Electrical data. [S.l.], 2015. 3 p. Citado 3 vezes nas páginas 9, 33 e 34.
- LIMA, C. B. de; VILLAÇA, M. V. M. *AVR e Arduino Técnicas de Projeto*. 2. ed. Florianópolis: Edição dos Autores, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- MALVINO, A.; BATES, D. J. *Eletrônica*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Ltda, 2007. Volume 2. Citado 5 vezes nas páginas 27, 29, 30, 31 e 37.
- MEHL, E. L. de M. Qualidade da energia elétrica. *Universidade Federal do Paraná*, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 9, 16, 23 e 24.
- OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S.; NAWAB, S. H. *Sinais e Sistemas*. 2. ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2010. Tradução Daniel Vieira; Rogério Bettoni; revisão técnica Marcio Eisencraft; Maria D. Miranda. Citado 3 vezes nas páginas 9, 25 e 26.

SIGLENT. *Data Sheet*: Function/arbitrary waveform generator. [S.l.], 2016. 10 p. Disponível em: <https://toolboom.com/nfs/product/849533/file/Siglent_SDG1020_1025_DataSheet.pdf>. Acesso em: 21 de Junho de 2018. Citado na página 47.

TEXAS INSTRUMENTS. *TL07xx Low-Noise JFET-Input Operational Amplifiers*. [S.l.], 2017. (SLOS080M). Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/slos080n/slos080n.pdf>>. Acesso em: 21 de Junho de 2018. Citado na página 41.

VELASCO, L. N. *Análise experimental de erros de medição de energia elétrica ativa em medidores eletromagnéticos tipo indução, sujeitos a distorções harmônicas de correntes e tensões, em sistemas equilibrados e desequilibrados*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira-SP, Abril 2007. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 24.

Anexos

ANEXO A – Processo de Calibração

Para o correto funcionamento da do sistema de monitoramento de qualidade de energia deve-se proceder com a calibração e verificação. A Figura 43 mostra o sistema montado e a seguir os passos para calibração.

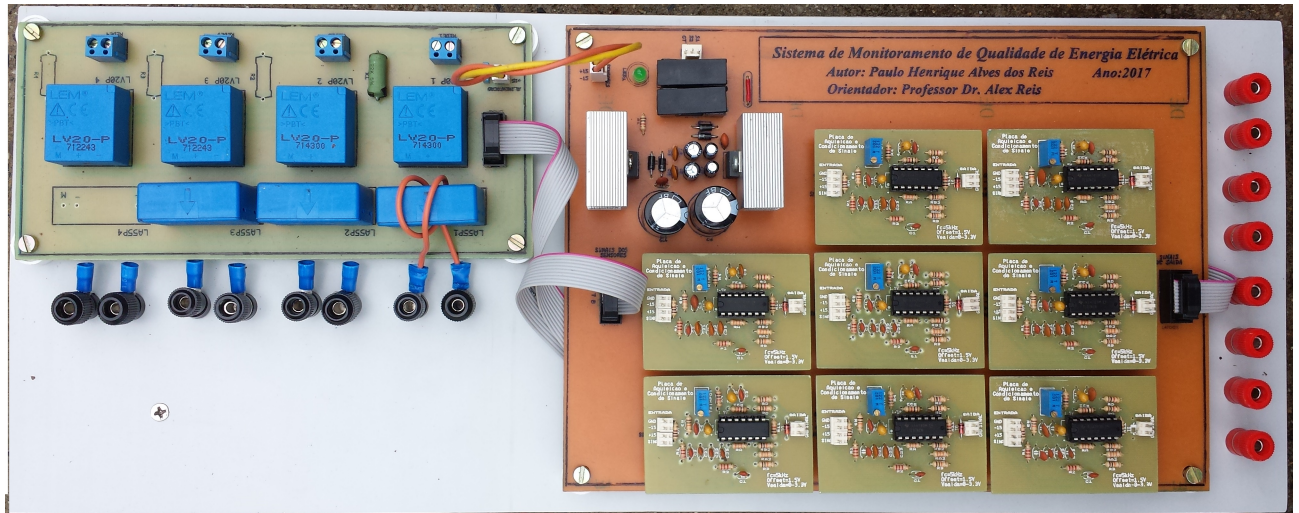


Figura 43 – Sistema de aquisição e condicionamento de sinais. Fonte: Própria.

Passo 1: Alimentar a placa mãe com o transformador e verificar com o multímetro as tensões correspondentes de +15 e -15 em relação ao GND em uma das entradas das placas de condicionamento de sinais.

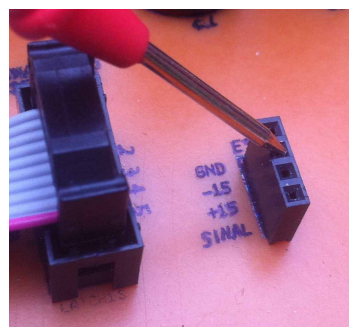


Figura 44 – Medição da tensão de alimentação. Fonte: Própria.

Passo 2: Conectar as placas de condicionamento de sinais , ajustar a tensão do *offset* para 1.5 V no pino 14 do amplificador operacional girando o parafuso no TRIMPOT.

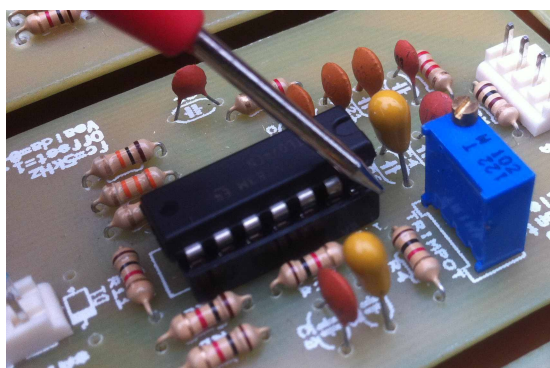


Figura 45 – Medição do *offset*. Fonte: Própria.

Passo 3: Conectar os sinais a serem medidos nos sensores, os de tensão devem ser conectados no conector KRE, e os de corrente devem ser conectados nos bornes, mas antes disso verificar o sentido da corrente no sensor de corrente indicado pela seta acima dele.

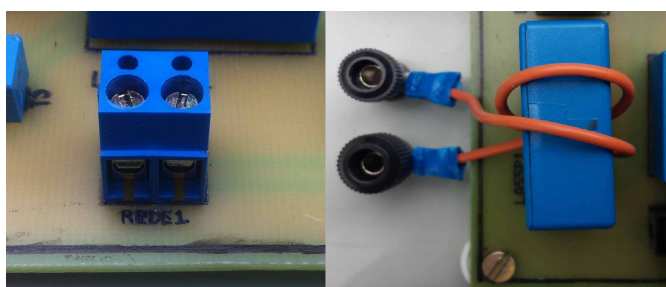


Figura 46 – Conexão do sensor de tensão e corrente. Fonte: Própria.

ANEXO B – Placas de Circuito Impresso

Este anexo traz os projetos das placas de circuito impresso na camada de cobre inferior em escala real.

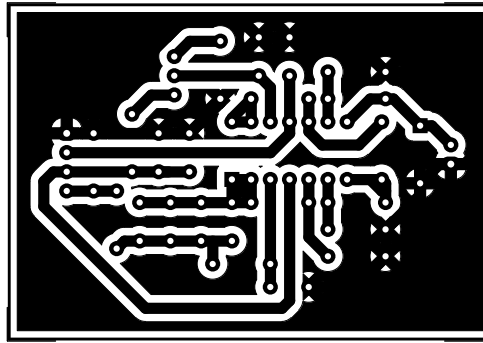


Figura 47 – Trilha da placa de condicionamento de sinais. Fonte: Própria.

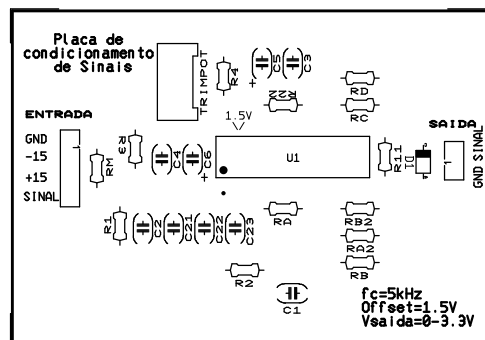


Figura 48 – Serigrafia da placa de condicionamento de sinais. Fonte: Própria.

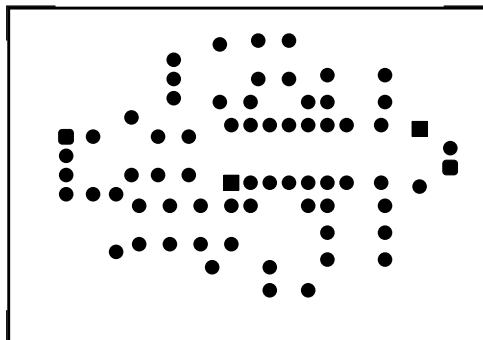


Figura 49 – Máscara de solda da placa de condicionamento de sinais. Fonte: Própria.

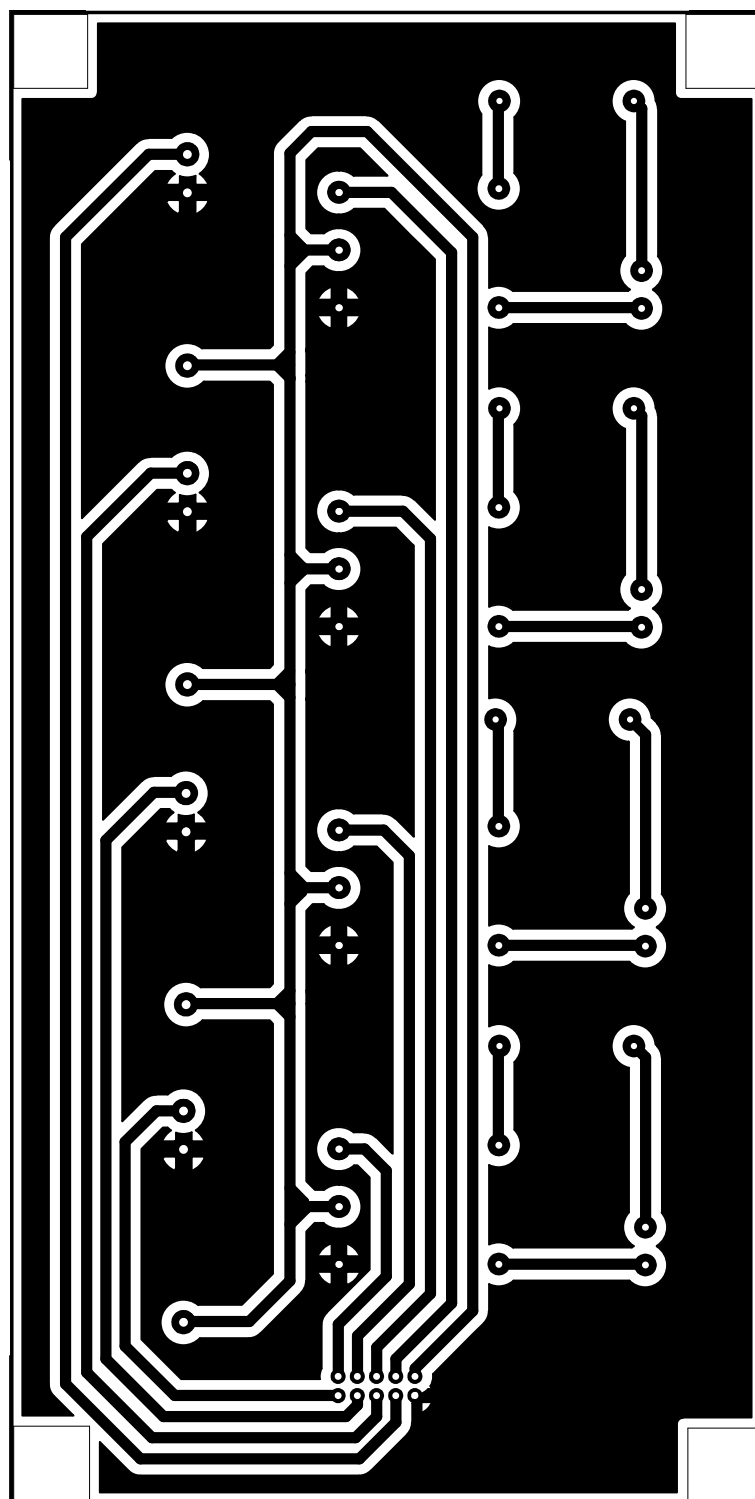


Figura 50 – Trilha da placa de sensores. Fonte: Própria.

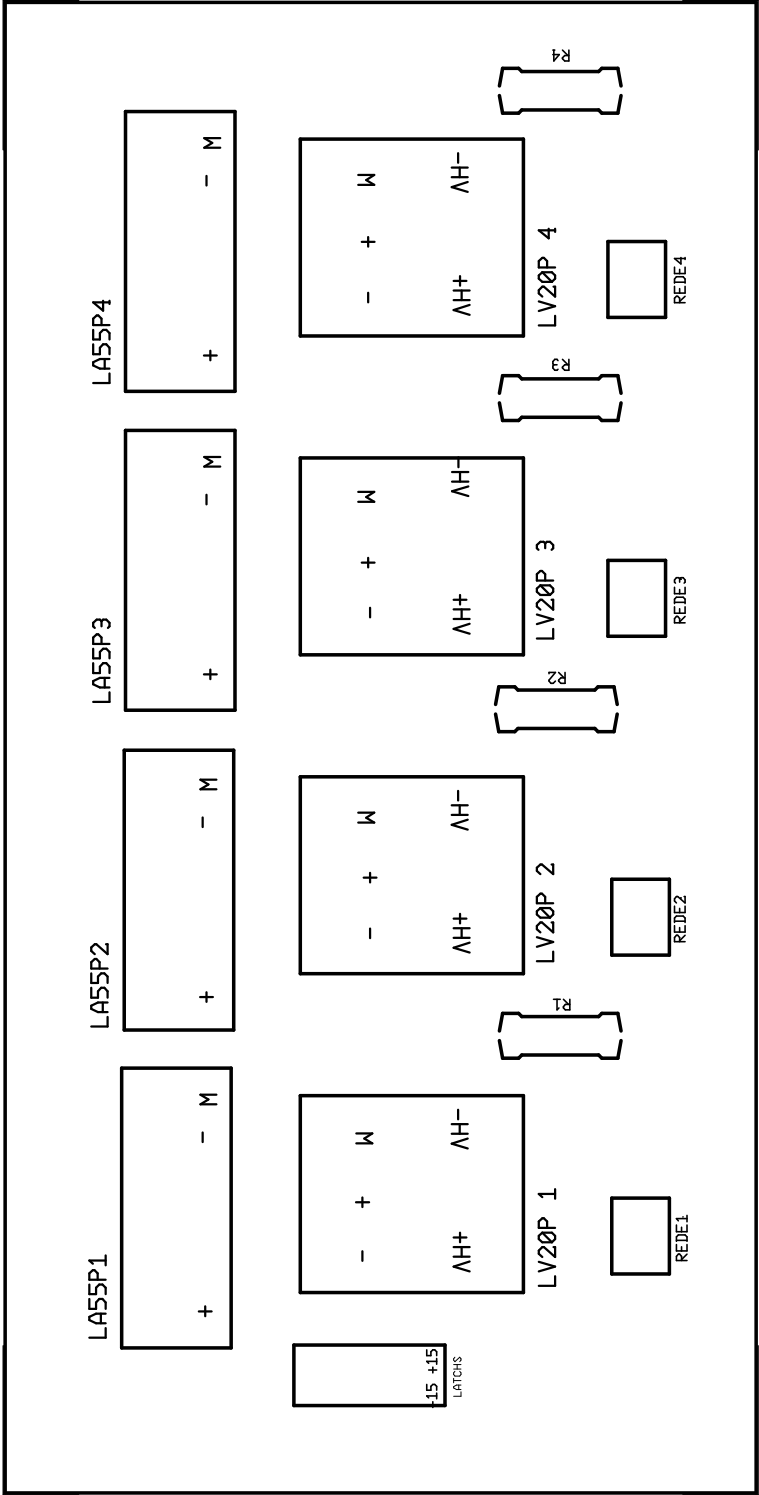


Figura 51 – Serigrafia da placa de sensores. Fonte: Própria.

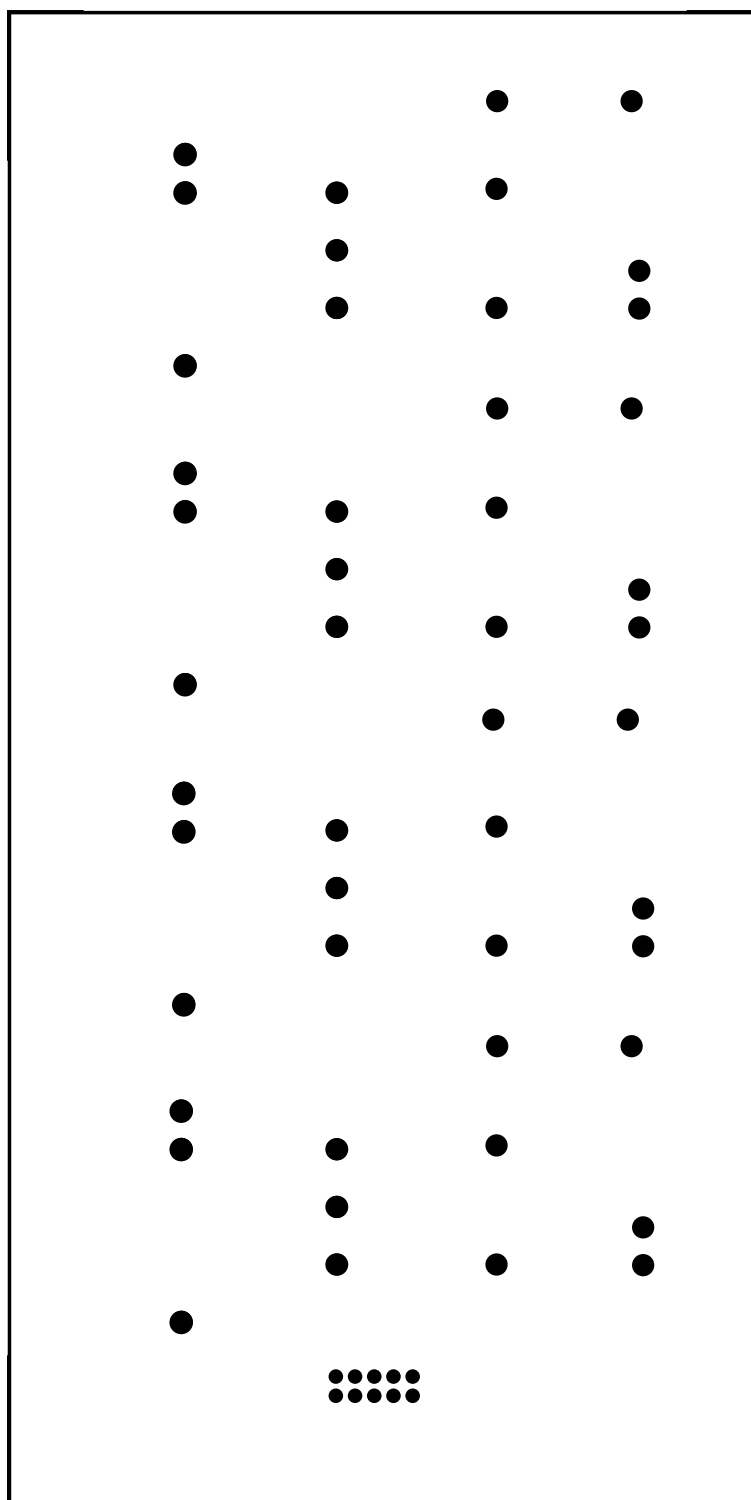


Figura 52 – Máscara de solda da placa de sensores. Fonte: Própria.

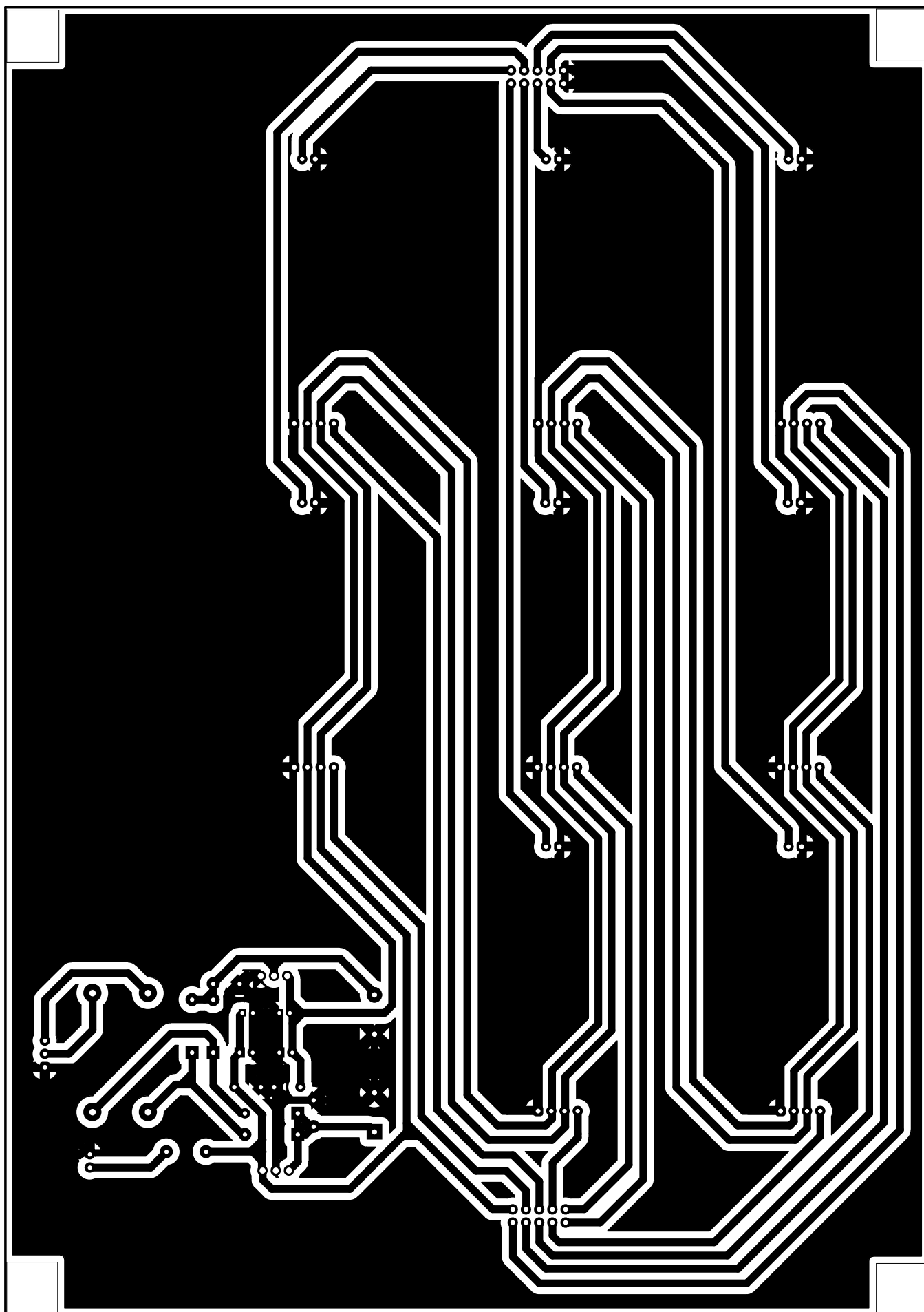


Figura 53 – Trilha da placa mãe. Fonte: Própria.

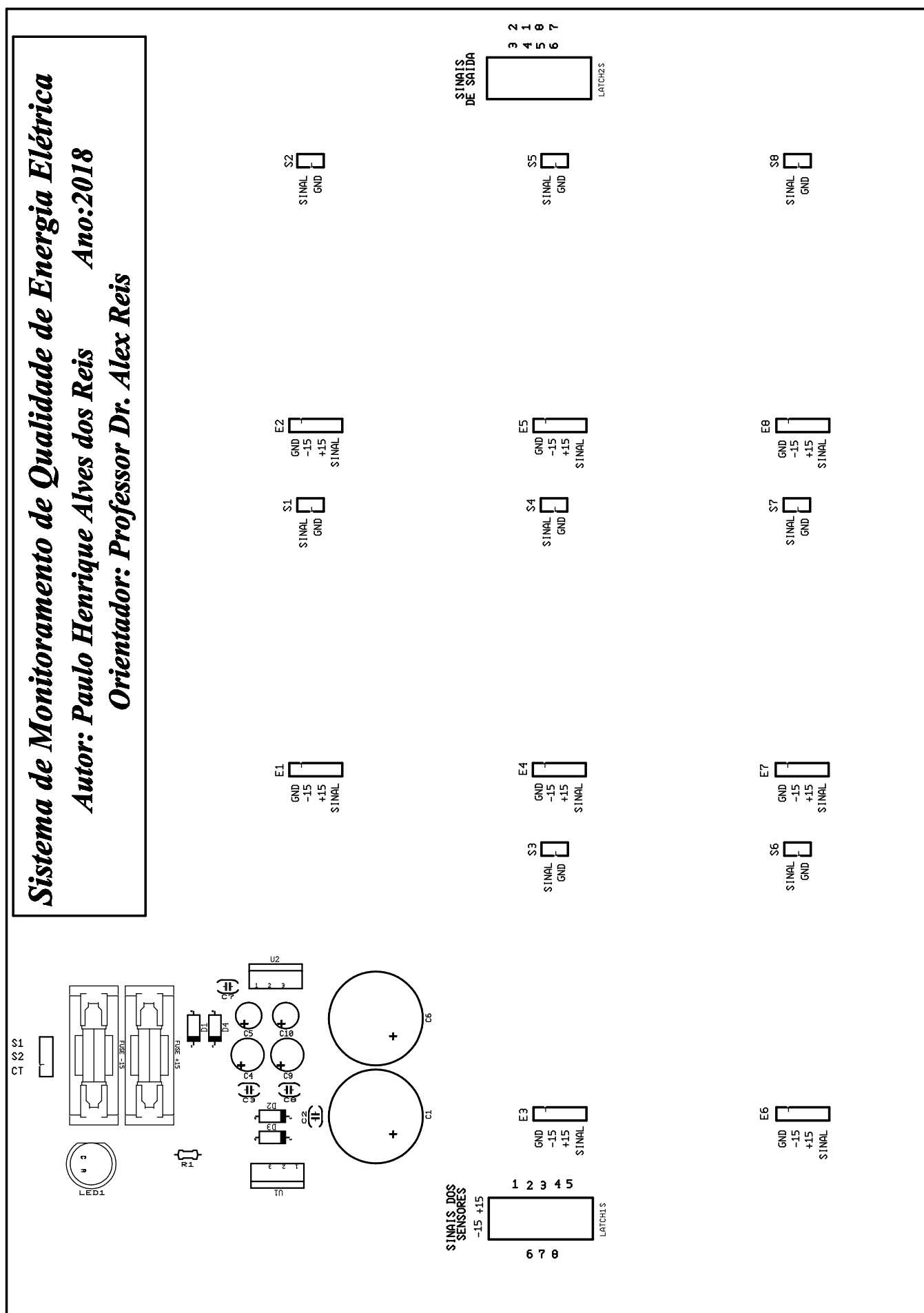


Figura 54 – Serigrafia da placa mãe. Fonte: Própria.

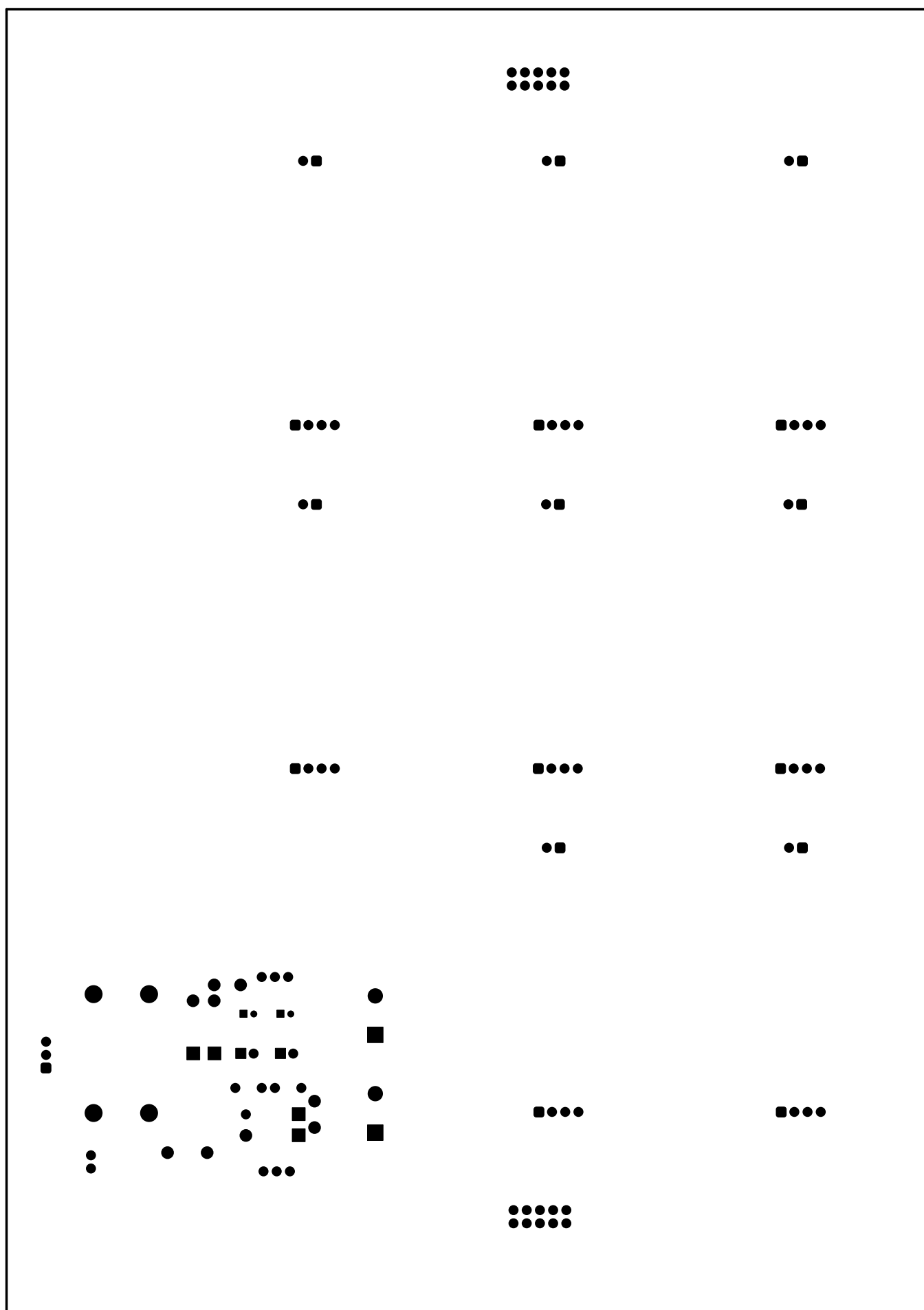


Figura 55 – Máscara de solda da placa mãe. Fonte: Própria.

ANEXO C – Lista de Componentes

Este anexo traz a lista de componentes de cada placa projetada.

Tabela 11 – Lista de componentes para placa de condicionamento de sinais.

Placa de Aquisição e Condicionamento de Sinais			
Componentes	Valor	Característica	Quantidade
C_3, C_4	$0,1 \mu F$	Cerâmico	2
C_5, C_6	$1 \mu F$	Tântalo	2
C_1, C_2	$10 nF$	Cerâmico	2
C_{21}, C_{22}, C_{23}	$1 nF$	Cerâmico	3
$R_4, R_{11}, R_{22}, R_C, R_D$	$1 k\Omega$	0,25 W	4
R_1, R_2	$2,2 k\Omega$	0,25 W	2
R_A, R_{A2}	$33 k\Omega$	0,25 W	2
R_3, R_B, R_{B2}	$10 k\Omega$	0,25 W	3
RM	100Ω	0,25 W	1
TRIMPOT	$1 k\Omega$	Multivoltas	1
1N4728	3,3 V	0,5 W	1
TL074		AMPOP	1
Conector de Entrada	4 Pinos	Molex (Macho)	1
Conector de Saída	2 Pinos	Molex (Macho)	1

Fonte: Própria.

Tabela 12 – Componentes da placa dos sensores.

Placa dos Sensores			
Componentes	Valor	Característica	Quantidade
LV 20-P		Efeito Hall	4
LA 55-P		Efeito Hall	4
C_1	$0,1 \mu F$	Cerâmico	1
R_1	$22 k\Omega$	5 W	4
Conector de Alimentação	2 Pinos	Molex (Macho)	1
Conector da Rede	2 Pinos	KRE	4
Conector de Saída	10 Pinos	LATCH (Macho)	1

Fonte: Própria.

Tabela 13 – Lista de componentes para a placa mãe.

Placa Mãe			
Componentes	Valor	Característica	Quantidade
C_2, C_3, C_7, C_8	$0,1 \mu F$	Cerâmico	4
C_4, C_9	$4,7 \mu F$	Eletrolítico	2
C_5, C_{10}	$10 \mu F$	Eletrolítico	2
C_1, C_6	$2200 \mu F$	Eletrolítico	2
1N4007	$1 A$	Retificador	4
LM7815	$+15 V$	Regulador	1
LM7915	$-15 V$	Regulador	1
Conector de Entrada do Trafo	3 Pinos	Molex (Macho)	1
Conector Barra Pino Fêmea PCI 1×4 - MCI	4 Pinos	2,54 mm 180°	8
Conector Barra Pino Fêmea PCI 1×2 - MCI	2 Pinos	2,54 mm 180°	8
Conector dos Sinais de Entrada e Saída	10 Pinos	LATCH (Macho)	2

Fonte: Própria.